

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra automatizace a počítačové techniky v metalurgii

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Objemové průtokoměry v průmyslu
Volumetric flowmeters in industry

2018

Bc. Kamil Stareček

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra automatizace a počítačové techniky v metalurgii

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Kamil Stareček**
Studijní program: N3922 Ekonomika a řízení průmyslových systémů
Studijní obor: 3902T042 Automatizace a počítačová technika v průmyslových technologiích
Téma: **Objemové průtokoměry v průmyslu**
Volumetric flowmeters in industry
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Průtokoměry a principy jejich funkce.
2. Návrh systému pro měření průtoku kapalin.
3. Realizace a testy průtokoměru v laboratorních podmínkách.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. MENTLÍK V., J. PIHERA a R. POLANSKÝ. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9
2. ROUBAL, J.. *Regulační technika v příkladech*. BEN, 2011. ISBN 978-80-7300-260-2
3. INCROPERA F., P. DEWITT, and L. BERGAMN. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. New Jersey: John Wiley & sons, 2006. ISBN 978-0471457282
4. VÁŇA, J. *Analýzátory plynů a kapalin*. Praha: SNTL, 1984.

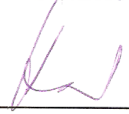
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

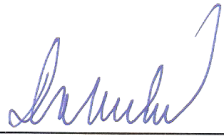
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Robert Frischer, Ph.D.**

Konzultant diplomové práce: Ing. et Ing. Hana Špačková

Datum zadání: 30.11.2017

Datum odevzdání: 23.04.2018


prof. Ing. Zora Košťálová Jančíková, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování diplomové práce

I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání diplomové práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah DP |
| 2. Originál zadání DP | 7. Textová část DP |
| 3. Zásady pro vypracování DP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

- ad 8) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

- ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

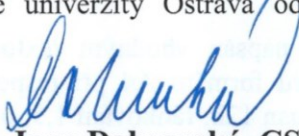
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení DP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2017/2018.

Ostrava 13. 11. 2017


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě 13.4. 2018

Kamil Škvrta
podpis (jméno a příjmení studenta)

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Robertovi Frischerovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a odborné konzultace při zpracování této práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá měřením průtoků různými metodami a měřidly. Práce obsahuje literární rešerši, kde jsou uvedeny různá měřidla, způsoby měření a jejich klady a zápory. V praktické části je sestaven ultrazvukový průtokoměr na bázi Dopplerova jevu a měřicí soustava potřebná k otestování průtokoměru se vzduchem a kapalinou. Všechna měření probíhala v laboratorních podmínkách a jsou zpracována do tabulek a grafů. V závěru práce je popsáno, ve které pracovní oblasti průtokoměr bez problémů pracuje a co je příčinou špatného chodu mimo pracovní oblast. Součástí práce je CD, kde je uložena veškerá fotodokumentace.

Klíčová slova

měření průtoku, průtokoměr, Dopplerův jev, zesilovač, transformátor, fázový posun

Abstract

This diploma thesis deals with flow measurement by various methods and devices. The thesis contains literary research, which presents various measuring instruments, measuring methods and positives and negatives. An ultrasound flowmeter based on the Doppler effect and a measuring system is required to test the flowmeter with air and liquid is used in the first part of practical measurement. All measurements were conducted in laboratory conditions and are processed in tables and graphs. At the end of the thesis it is described in which working area the flowmeter works without problems and what causes the wrong operation outside the working area.

Key words

flow measurement, flowmeter, doppler effect, amplifier, transformer, phase shift

OBSAH:	
1 ÚVOD	11
2 PRŮTOKOMĚRY A PRINCIPY JEJICH FUNKCE	12
2.1 Objemové průtokoměry	12
2.1.1 Oválový průtokoměr	12
2.1.2 Bubnový průtokoměr	13
2.2 Rychlostní průtokoměry	14
2.2.1 Průřezové průtokoměry	14
2.2.2 Coriolisův hmotnostní průtokoměr	16
2.2.3 Šroubové a lopatkové průtokoměry	17
2.2.4 Plovákové průtokoměry	18
2.2.5 Turbínové průtokoměry	18
2.2.6 Tepelné průtokoměry	19
2.2.7 Magneticko-indukční průtokoměry	20
2.2.8 Ultrazvukové průtokoměry	21
3 DOPPLEROVSKÉ PRŮTOKOMĚRY V PRŮMYSLU	27
3.1 Přenosný průtokoměr Greyline PDFM 5.1	27
3.1.1 Montáž průtokoměru	27
3.1.2 Princip měření průtokoměru	29
4 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ	31
4.1 Návrh měřicího okruhu	34
4.2 Testování funkčnosti zesilovače s transformátorem	46
4.3 Test průtokoměru se vzduchem	48
4.4 Test průtokoměru s vodou	51
5 ZÁVĚR	56
6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	57
Seznam obrázků:	60
Seznam tabulek a grafů	62
PŘÍLOHY	63

1 ÚVOD

Tato práce se zabývá objemovými průtokoměry v průmyslu a je zde popsána tematika měření průtoku různými metodami. Práce obsahuje rozdělení průtokoměrů podle principu měření. Každý průtokoměr je popsán a jsou vyzdvihnuty klady a zápory měření a použití. Je zde podrobněji popsána kapitola ultrazvukových průtokoměrů.

V praktické části je sestaven průtokoměr s novou variantou, která je postavena na novém konceptu z důvodu neúspěšného sestavení průtokoměru, se kterým se pracovalo v bakalářské práci. V bakalářské práci se ukázaly chyby prokázané různými měřeními a v závěru došlo na různá doporučení pro správný chod průtokoměru.

V další části je podrobně popsáno sestavení ultrazvukového průtokoměru na bázi Dopplerova jevu. Jsou popsány všechny komponenty potřebné jak pro průtokoměr, tak i pro měřicí soustavu. Podrobněji jsou popsána jednotlivá měření, která byla postupně prováděna v laboratorních podmínkách, jak se vzduchem, tak i s vodou.

Cílem práce je správné sestavení ultrazvukového průtokoměru na bázi Dopplerova jevu a ověření jeho funkčnosti. Toto ověření se musí potvrdit na fázovém posunu. Přílohou diplomové práce je CD s veškerou fotodokumentací průtokoměru a měření.

2 PRŮTOKOMĚRY A PRINCIPY JEJICH FUNKCE

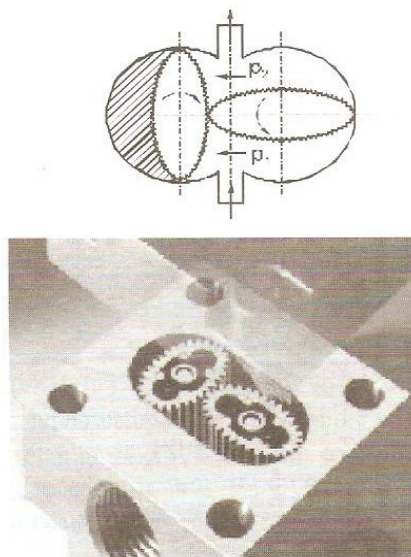
V této kapitole jsou uvedeny nejběžnější průtokoměry rozdělené podle principu jejich funkce. Dělí se na dvě základní skupiny - objemové průtokoměry, které měří objem kapaliny, která projde přes měřidlo a rychlostní průtokoměry, které měří samotnou rychlost proudící kapaliny.

2.1 Objemové průtokoměry

Objemové nebo také hmotnostní průtokoměry pracují na principu přímého měření hmotnosti či objemu kapaliny. Jedná se tedy o objemový, či hmotnostní průtok. Objemový průtok ukazuje objem tekutiny, která projde potrubím za jednotku času (např. litry za minutu), hmotnostní průtok udává hmotnost kapaliny, která projde potrubím za jednotku času (např. kilogramy za minutu). Tyto metody mají velmi vysokou třídu přesnosti. Při měření se tekutiny dělí na dílčí objemy, které jsou tvořeny rotujícími mechanickými prvky měřidla. Měření může být buď spojitě či diskrétně. Při spojitém měření se cyklicky plní a vyprazdňují odměrné prostory, tak aby bylo dosaženo plynulého měření. Měřitelným výsledkem je poté počet cyklů za jednotu času. [22] Při diskrétním měření kapalina vtéká do vyměřených objemových prostor a tím jak jsou tyto prostory naplňovány a vyprazdňovány je kapalina rozdělena do dávek. Počet těchto dávek poté určuje konečný průtok kapaliny. V praxi se této metody využívá hlavně jako kalibračního měřidla. [1]

2.1.1 Oválný průtokoměr

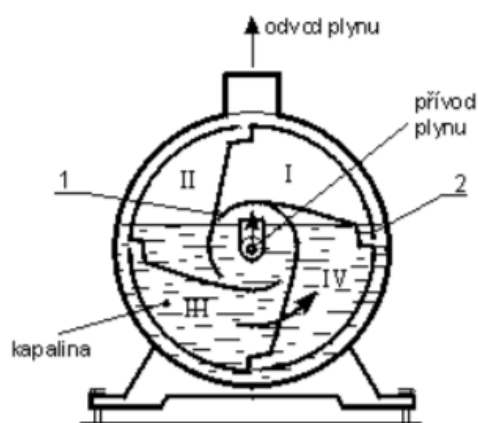
Průtokoměr s oválnými koly je objemové měřidlo, kde protékající kapalina uvádí do otáčivého pohybu oválná kola uvnitř přesně měřící komory. Při každé otáčce proteče průtokoměrem přesný objem kapaliny. Tato oválná kola mohou být ozubená, nebo jsou poháněny pomocí ozubených kol. [24]



Obr. 1. Oválný průtokoměr s ozubenými koly - princip a konstrukce [1]

2.1.2 Bubnový průtokoměr

Bubnový průtokoměr je složen ze tří otočných měřících bubnů. Měřená kapalina vteče přítokovou trubicí do první, nejnižší položené komory. Jakmile se komora naplní, kapalina teče do dalšího bubnu, přitom se změní těžiště a buben se otočí o 120° a kapalina teče do další komory. Takto se celý proces opakuje. Pohyb bubnu je snímán a tímto je měřen průtok. [1]



Obr. 2. Bubnový průtokoměr [14]

2.2 Rychlostní průtokoměry

Nejpoužívanějšími snímači průtoku v provozech jsou rychlostní průtokoměry. Jedná se o velké množství druhů, jež se liší způsobem měření střední rychlosti proudění.

2.2.1 Průřezové průtokoměry

Průřezové průtokoměry pracují na principu měření poklesu tlaku, který vzniká zvýšením rychlosti proudění v zúženém místě. Výsledný průtok je rozdílem tlaků před a za místem zúžení, přičemž se k němu používá diferenční tlakoměr. Jako škrťací člen se používají clony, dýzy či Venturiho trubice. [1] Další průtokoměry, které jsou založeny na stejném principu, jsou Prandtlůva trubice, Pitotova trubice, plováčkové průtokoměry a další. [3]

Tlakové poměry v potrubí při proudění lze popsat pomocí Bernoulliho rovnice. Jedná se o vyjádření zákona zachování mechanické energie v tekutinách, který říká, že při stejných podmínkách tlak v tekutině klesá s nárůstem rychlosti jejího proudění. Tohoto jevu lze dosáhnout, jestliže do potrubí, ve kterém proudí tekutina, vložíme překážku. Kinetická energie tekutiny při průchodu překážkou bude růst při poklesu statického tlaku v tekutině (potenciální energie). Rozdíl tlaků před a za škrťacím orgánem je přímo úměrný druhé mocnině rychlosti proudění (1). [4]:

$$v = k \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p}{\rho}} \quad [\text{m.s}^{-1}] \quad (1)$$

kde v je rychlost proudění tekutiny $[\text{m.s}^{-1}]$,

k - konstanta určující vlastnosti primárního prvku průtokoměru [-],

Δp - diferenční tlak $[\text{Pa}]$,

Clona

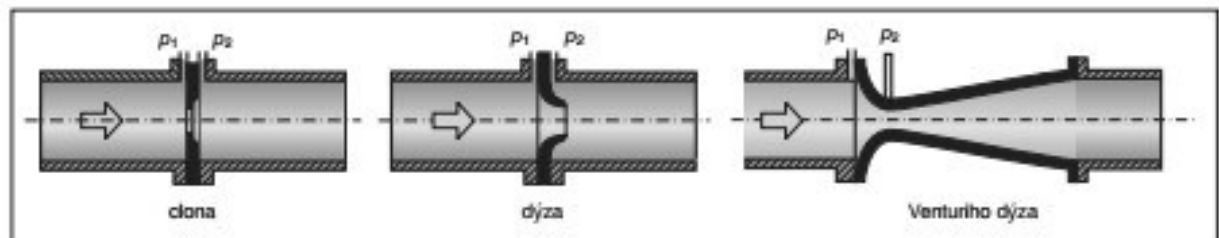
Clona je kovová deska s otvorem, která se vkládá do potrubí. V závislosti na umístění a typu měřené tekutiny se volí průměr škrtícího otvoru. Tlak se měří těsně před a za deskou. Vzhledem k tomu, že jsou clony náchylné k opotřebení, používají se tyto typy pro měření tlaku v čistých kapalinách a clona bývá zabudována do přímého úseku potrubí s uklidňujícími úseky před a za clonou. [1, 2]

Dýza

Dýza se skládá ze vstupní části, která má zaoblený profil a z hrdla válcovitého tvaru s ostrým zakončením. Výhodou proti cloně je nutnost kratších uklidňujících délek a menší tlaková ztráta. Umožňuje měřit vyšší průtok než clona a také kapaliny, které obsahují větší částice. [1]

Venturiho trubice

Při průchodu Venturiho trubicí, dochází ke zrychlení průtoku kapaliny v zúžení trubice, přičemž dojde k poklesu místního statického tlaku. V další části trubice, která je opět rozšířená, dochází k opětovnému zpomalení průtoku a tlak se vrací téměř na původní velikost. Výhodou použití je malá tlaková ztráta, ale kvůli poměrně vysoké ceně, se Venturiho trubice moc nepoužívá. [2]



Obr. 3. Clona, dýza, Venturiho trubice. Statický tlak před zúžením p_1 a v místě zúžení p_2 [24]

Prandtlůva trubice

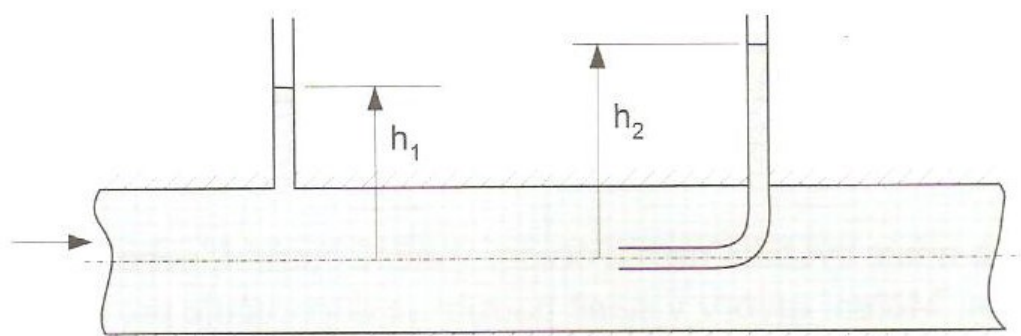
Prandtlůva trubice je velmi rozšířená pro snímání dynamického tlaku. Jedná se o trubicí, která je spojena dvěma trubičkami s tlakoměrem. Tyto hadičky přenášejí celkový tlak, který je daný součtem statického a dynamického tlaku, a statický tlak v kanálu. Celkový tlak je snímán otvorem, který je umístěn na konci trubice, nastaveným proti směru proudění.

Statický tlak je snímán v otvoru, který je umístěn tak, aby se v něm vliv proudění neprojevil. Snímač tlakového rozdílu měří rozdíl obou tlaků - tedy tlak dynamický. Tento dynamický tlak závisí na rychlosti proudění a hustotě plynu. Prandtlůva trubice je velmi jednoduchá a z hlediska mechanického provedení současně stabilní a robustní. Nepůsobí na ni velkou mírou nepříznivé vlivy okolí jako například vysoké teploty, znečištěný vzduch či agresivní plyny. Je současně odolná vůči mechanickým vlivům.

Pitotova trubice

Měření pomocí Pitotovy trubice také patří mezi jedny z nejstarších principů měření průtoků. Měření probíhá pomocí tenké trubičky vložené ústím kolmo ve směru proudící kapaliny. V ústí trubičky dojde k poklesu rychlosti proudění přibližně k nule a kinetická energie se změní na energii potenciální. Měřič snímá celkový tlak kapaliny, který je dán součtem statického a dynamického tlaku.

Z důvodu možného zanesení otvorů trubice se Pitotova trubice používá pro měření průtoku plynů nebo velmi čistých kapalin. [6]

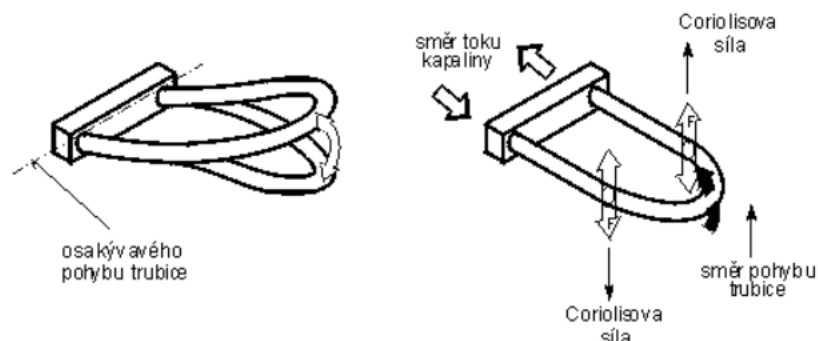


Obr. 4. Princip Pitotovy trubice [24]

2.2.2 Coriolisův hmotnostní průtokoměr

Coriolisův hmotnostní průtokoměr využívá při měření Coriolisovy síly, což je síla, která způsobuje, že všechna tělesa, která se pohybují po povrchu Země, se vychylují do strany z důvodu rotace planety. Na severní polokouli se tělesa vychylují doprava, na jižní doleva. Průtokoměr se skládá z jedné či dvou zakřivených či přímých měřících trubic. Trubice je rozkmitána rovnoměrnými kmity a setrvačností a urychlováním tekutiny vzniká Coriolisova

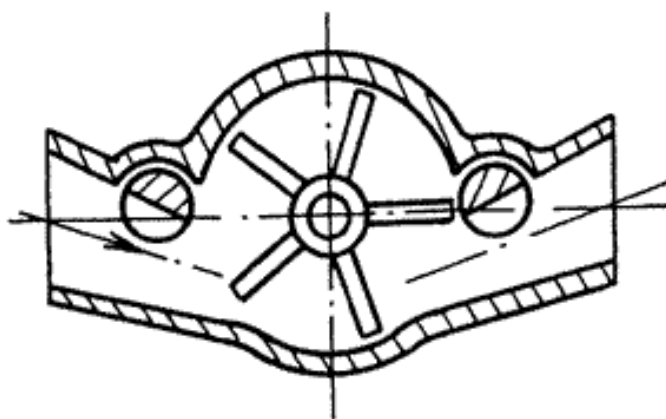
síla. Tato síla způsobí deformaci měřicí trubice a tato deformace je přímo úměrná hmotnostnímu průtoku. Měření probíhá speciálními senzory, které současně snímají i teplotu kapaliny, protože deformace měřicí trubice závisí také na teplotě. [8]



Obr. 5. Coriolisův průtokoměr - bez proudící tekutiny a s působením Coriolisovy síly [14]

2.2.3 Šroubové a lopatkové průtokoměry

Šroubové průtokoměry jsou složeny z dvou měřících vřeten se šroubovicí uloženou uvnitř tělesa. Při průtoku kapaliny jsou vřetena uvedena do rotace, která je snímána pomocí senzorů a převedena na měřící signál. Tyto průtokoměry jsou velmi přesné a vyznačují se opakovatelností přesnosti. Další předností je malá tlaková ztráta při průtoku kapaliny. Měření pomocí lopatkových průtokoměru probíhá snímáním otáčení lopatek při průtoku kapaliny.



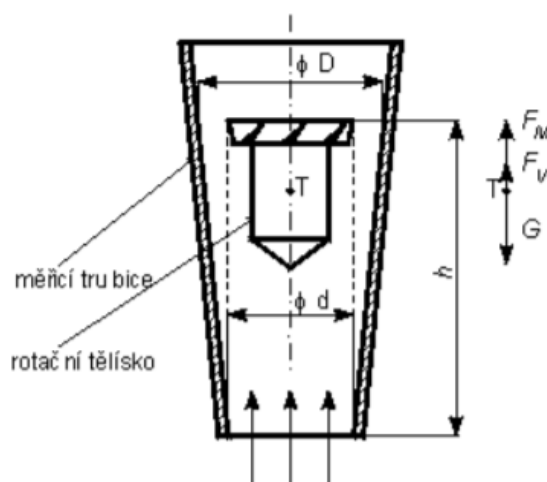
Obr. 6. Lopatkový průtokoměr [14]

2.2.4 Plovákové průtokoměry

Plovákové průtokoměry jsou složeny z kuželovité trubice, ve které je umístěn plovák. Ten je nadnášen proudící kapalinou, která svou rychlostí proudění mění polohu plováku.

Rotametr

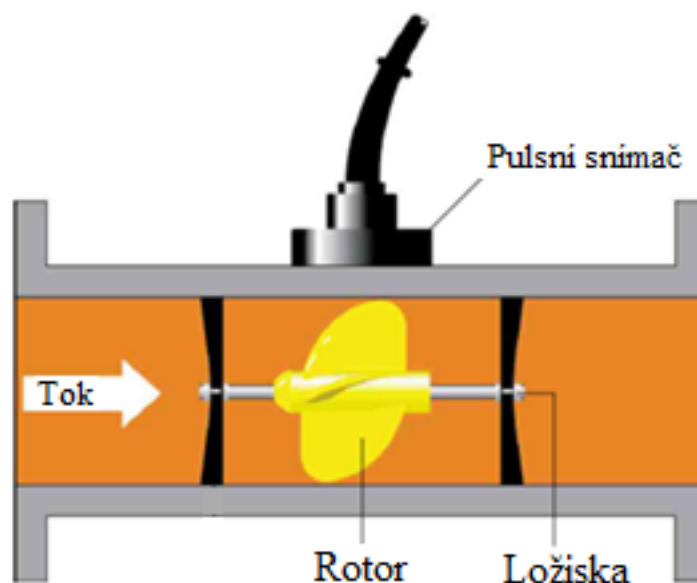
Plovákové průtokoměry mají proměnný průřez. Přístroj pracuje na principu pohybu plováku, který je nadnášen proudící kapalinou při stálém tlakovém rozdílu nad plovákem a pod ním, rychlost proudění vyvolává změnu polohy plováčku.



Obr. 7. Rotametr [22]

2.2.5 Turbínové průtokoměry

Při měření turbínovým průtokoměrem prochází měřidlem kapalina a působí na šikmo orientované lopatky rotoru, který tímto pohybem roztáčí. Princip měření spočívá v počtu otáček rotoru, který je závislý na proteklém množství kapaliny. Otáčky mohou být snímány různým způsobem - kontaktně či bezkontaktně. Měřený průtok závisí jen na mechanických parametrech kapaliny. Není ovlivněn jejím proměnlivým složením či elektrickými vlastnostmi. Velmi málo je ovlivněn teplotou a je dobře reprodukovatelný. [9]



Obr. 8. Řez turbínovým průtokoměrem [16]

2.2.6 Tepelné průtokoměry

Základní princip tepelných průtokoměrů využívá princip vlivu proudění kapaliny na šíření tepla. Změny v rozložení teploty v proudící kapalině jsou úměrné množství proteklé kapaliny. Měření není závislé na teplotě a tlaku měřené kapaliny. Hlavní předností těchto průtokoměrů je vysoká přesnost, rychlá odezva a stabilita parametrů. Podle způsobu působení měřeného média na čidlo se tepelné průtokoměry dělí na termoanemometry a kalorimetry.

Termoanemometry

V tomto typu průtokoměru jsou tepelná čidla přímo v proudící tekutině a vyhodnocuje se chladicí účinek na vyhřívané čidlo. V potrubí jsou uložena dvě čidla o rozdílném odporu. Když se potrubím kapalina nepohybuje, chladí se čidlo pomocí přirozené konvekce, pokud ale k proudění dochází, teplo je odváděno hlavně nucenou konvekcí. To se projeví ochlazováním čidla. [22]

Kalorimetry

Na rozdíl od termoanemometrů se měří míra oteplení, která je způsobená prouděním kapaliny. Senzor je vytvořen na tenkostěnné obtokové kapiláře. V této kapiláře je vloženo topné tělísko, které jí neustále dodává teplo. Po obou stranách topného tělíska jsou umístěny teplotní senzory. Když se kapalina nepohybuje, teplota na obou senzorech je totožná. Když se

kapalina pohybuje, dojde k ochlazování senzorů a jeden bude mít vyšší teplotu. Rozdíl teplot na senzorech poté udává průtok. [13]

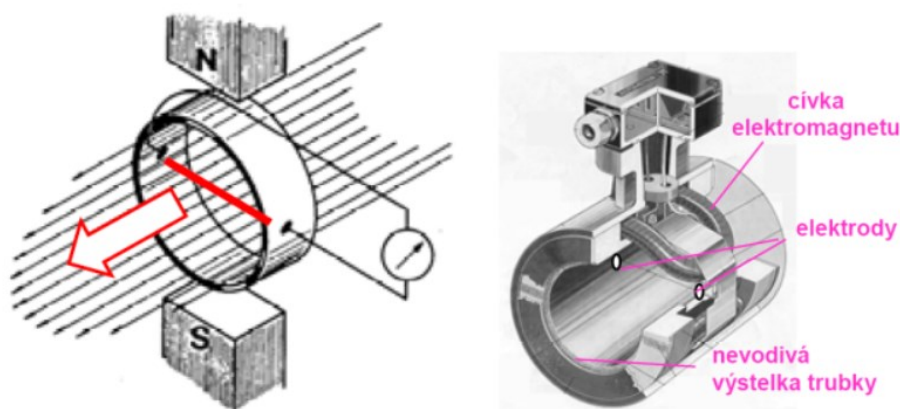
2.2.7 Magneticko-indukční průtokoměry

Tato měřidla patří mezi velmi přesné průtokoměry dnešní doby. Je možné s nimi měřit široké spektrum kapalin, které ale musí splňovat podmínku minimální vodivosti. Jsou vhodné také pro kapaliny s vysokou viskozitou. Měřicí princip je nejčastěji vysvětlen za pomoci Faradayova zákona o elektromagnetické indukci při pohybu vodiče v elektrickém poli. (2) [1] V tomto případě roli vodiče hraje proudící kapalina. Trubice musí být zcela zaplněna kapalinou, která je vodivá, naopak trubice musí být nevodivá. [12]

$$u = B \cdot l \cdot v \quad [\text{V}] \quad (2)$$

kde	u	je	indukované napětí [V],
	B	-	magnetická indukce [T],
	v	-	rychlost vodiče (proudění kapaliny) [m.s ⁻¹],
	l	-	délka vodiče – vzdálenost elektrod [m]

Jsou dva možné způsoby konstrukce měřidel. V prvním případě jsou elektrody vloženy přímo do proudící kapaliny, v druhém se umísťují vně potrubí. V první případě musí být elektrody vyrobeny z nemagnetického, vodivého materiálu, poté ale nejsou vhodné do prostředí, ve kterém se mění teplota nebo do kyselin či horkých kapalin. Novějším řešením je elektromagnetický průtokoměr s elektrodami, které se umísťují na vnější povrch měřicí trubice. Část potrubí, kde jsou umístěny magnety, je z neferomagnetického a nevodivého materiálu. Při zaplněném potrubí není přesnost měření ovlivněna fyzikálními vlastnostmi kapaliny. V těchto průtokoměrech nejsou žádné pohyblivé či mechanické části a měření není ovlivněno ani tlakem, hustotou či složením kapalin.



Obr. 9. Obecný princip a praktická realizace průtokoměru [12]

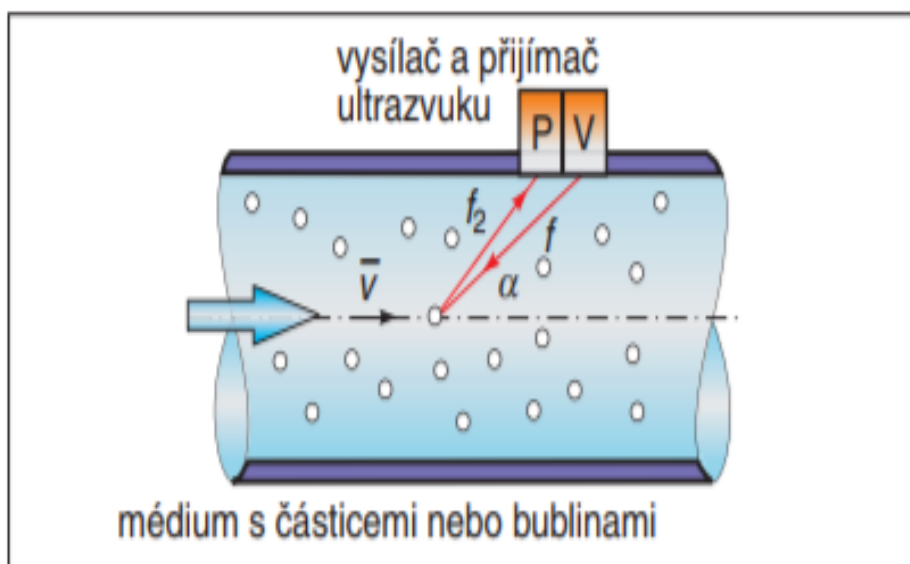
2.2.8 Ultrazvukové průtokoměry

Ultrazvukové průtokoměry jsou snímače, které jsou založeny na změně rychlosti šíření nebo frekvence ultrazvukového vlnění při průtoku kapaliny. Ultrazvukové vlnění se šíří od vysílače k přijímači, které jsou umístěny na stěnu potrubí, ve kterém se měřená kapalina pohybuje. Proudění kapaliny změní rychlost ultrazvukového vlnění, které je vysíláno i přijímáno ultrazvukovým měřičem. [10] Ultrazvukové průtokoměry lze použít k měření průtoku téměř jakéhokoli kapalného média, ať vodivého či nevodivého včetně agresivních kapalin. Vyznačují se vysokou přesností, stabilitou měření a nenáročnou údržbou.

Dnes se používají dva základní typy ultrazvukových průtokoměrů. Průtokoměry využívající Dopplerův jev a průtokoměry, které měří dobu průchodu ultrazvukového signálu. Podle provedení se pak oba typy mohou z hlediska montáže dělit na provedení se smáčenými snímači, které jsou nedílnou součástí měřicí trubice a na provedení s příloženými snímači, které jsou přikládány na stěnu potrubí. [11]

Průtokoměr založen na Dopplerově jevu

Tento typ měřidla se používá, když kapalina obsahuje pevné částice či bubliny plynu. Tyto částice odrážejí zvuk a bez nich nelze průtokoměr použít. Je složen z vysílače a přijímače ultrazvuku, které jsou připevněny na vnější straně potrubí buď z jedné nebo z obou stran. Vysílač pošle ultrazvukový signál o známé frekvenci do kapaliny, ultrazvuk se odrazí od částice v médiu, u níž předpokládáme, že se pohybuje stejně rychle, jako samotná kapalina. Snímač pak vyhodnotí změnu frekvence u této vlny.



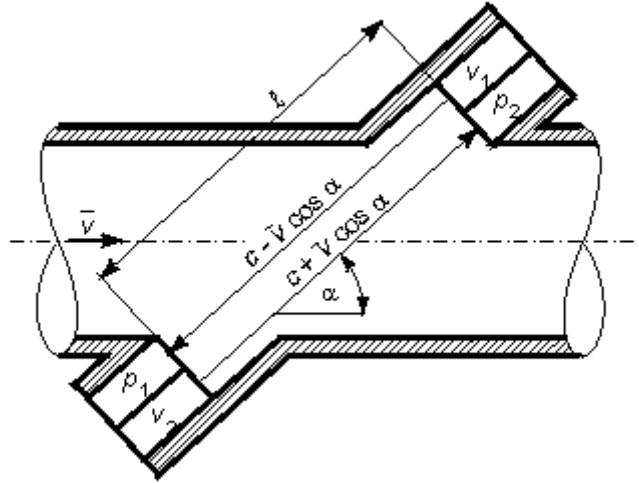
Obr. 10. Princip Dopplerova průtokoměru [11]

Tento typ průtokoměrů se většinou používají pro měření průtoků kalů, nebo krve, protože jsou závislé na typu a velikosti částic. [21]

Průtokoměry s vyhodnocováním doby průchodu signálu

Tato metoda je založena na tom, že se ultrazvukový signál pohybuje rychleji ve směru toku látky, než proti němu. Rozdíl průchodu mezi těmito signály je poté přímo úměrná rychlost průtoku. Doba prodlevy průchodu signálu se měří v krátkých intervalech ve směru i proti směru proudění, proto nemají odchylky viskozity a teploty žádný vliv na přesnost měření.

Základ tohoto typu průtokoměru je tvořen vysílačem a přijímačem ultrazvukového signálu. Nejčastěji je využito piezoelektrických měničů, které lze použít jako vysílače i přijímače signálu. Frekvence vlnění je závislá na rezonanční frekvenci měniče a pohybuje se obvykle mezi 0,5 až 1 MHz. Průtokoměry jsou často sestaveny tak aby se těmito vysílači a přijímači se současně poslal ultrazvukový signál ve směru i proti směru proudění. Toto je znázorněno na obrázku. Tyto signály jsou vyslány ve formě impulsů a vyhodnocují se časové rozdíly při průchodu impulsů v obou směrech šíření.



Obr. 11. Ultrazvukový průtokoměr s vyhodnocením doby průchodu signálu [11]

Vysílač V1 vyšle impuls ve směru proudění a vysílač V2 proti. Impuls z vysílače V1 se šíří rychlostí $c + v \cos \alpha$ (3), kde c je rychlost šíření ultrazvuku v dané kapalině, v je střední rychlost proudícího média. Pak pro rychlost šíření impulsu od vysílače V2 platí: $c - v \cos \alpha$ (4).

Doby mezi vysláním a přijmutím impulsu pro jednotlivé dvojice vysílače a přijímače jsou t_1 a t_2 (5):

$$t_1 = \frac{L}{c + \underline{v} \cdot \cos \alpha} \quad [\text{s}]$$

(3)

$$t_2 = \frac{L}{c - \underline{v} \cdot \cos \alpha} \quad [\text{s}]$$

(4)

a jejich rozdíl

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2 L \cdot \underline{v} \cdot \cos \alpha}{c^2 + \underline{v} \cdot \cos^2 \alpha} \quad [\text{s}] \quad (5)$$

Za předpokladu, že $v^2 \ll c^2$, je možné vztah zjednodušit a upravit na

$$\underline{v} = \frac{c^2}{2 \cdot L \cdot \cos \alpha} \Delta t \quad [\text{m.s}^{-1}]$$

(6)

Pro rychlost ultrazvuku lze psát

$$c = \frac{2 \cdot L}{t_1 + t_2} \quad [\text{m.s}^{-1}] \quad (7)$$

a po dosazení do vztahu (6) pro rychlost se získají výsledné vztahy pro střední rychlost

$$\underline{v} = \frac{\Delta t}{(t_1 + t_2)^2} \frac{2 \cdot L}{\cos \alpha} \quad [\text{s}] \quad (8)$$

a objemový průtok

$$Q_v = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L}{2 \cdot \cos \alpha} \frac{\Delta t}{(t_1 + t_2)^2} \quad [\text{m.s}^{-1}] \quad (9)$$

kde Q_v je objemový průtok $[\text{m.s}^{-1}]$

D - průměr potrubí $[\text{m}]$

L - vzdálenost mezi přijímači a vysílači $[\text{m}]$

t_1 - rychlost šíření impulzu od vysílače 1 $[\text{s}^{-1}]$

t_2 - rychlost šíření impulzu od vysílače 2 $[\text{s}^{-1}]$

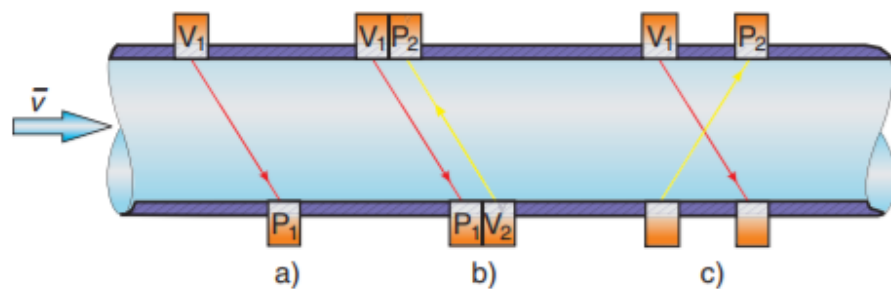
α - úhel mezi dráhou impulzu a stěnou potrubí $[-]$

v - rychlost proudící vody $[\text{m.s}^{-1}]$

c - rychlost ultrazvuku v kapalině $[\text{m.s}^{-1}]$

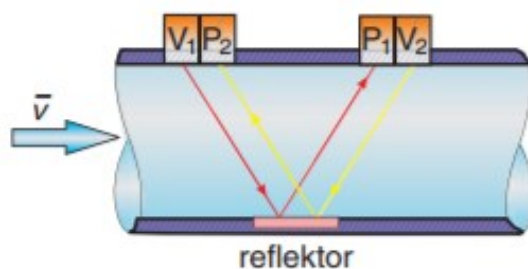
Protože se výsledném vztahu nevyskytuje rychlost šíření ultrazvuku v médiu c , není ani výsledek závislý na složení, teplotě a tlaku média. [11]

Umístění ultrazvukových měničů v měřicí trubici se může lišit podle použití. Na obr. 12 a je nejjednodušší uspořádání, které používá jednu dvojici vysílače a přijímače. U diferenčního uspořádání se používají dva páry měničů (b, c).

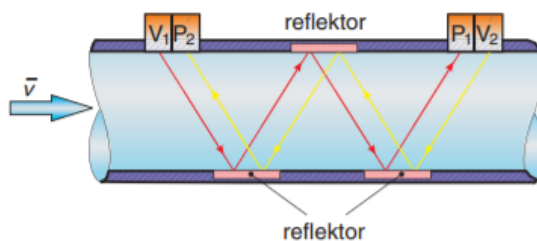


Obr. 12. Umístění ultrazvukových měničů v měřící trubici [11]

Při prodloužení dráhy mezi vysílačem a přijímačem ultrazvuku je dosaženo větší citlivosti. V tomto uspořádání se využívá odrazu od protější strany potrubí případně od zabudované odrazové plochy - reflektoru (obr. 13) nebo opakovaného odrazu od několika reflektorů, které jsou umístěny v měřící trubici (obr. 14).

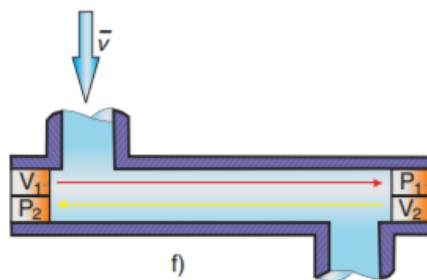


Obr. 13. Umístění ultrazvukových měničů s reflektorem [11]



Obr. 14. Umístění ultrazvukových s opakovaným odrazem [11]

V potrubích s malými světlostmi se využívá axiálního uspořádání. [11]



Obr. 15. Axiální uspořádání ultrazvukových měničů [11]

Je řada výhod použití ultrazvukových měřičů. Jsou použitelné nejen k měření kapalin, ale také plynů a nasycené páry. Mohou pracovat v jakékoli poloze a měřit v jakémkoli směru. Je možné je využít pro různé velikosti průtoků a to jak čistých tak znečištěných či agresivních kapalin i za vysokých teplot. Jsou poměrně univerzální a použitelné pro většinu kapalin. Špatný vliv může mít velmi velké množství částic či bublin, které způsobují útlum ultrazvukového signálu. [22]

3 DOPPLEROVSKÉ PRŮTOKOMĚRY V PRŮMYSLU

3.1 Přenosný průtokoměr Greyline PDFM 5.1

Tento průtokoměr umí zobrazovat, zapisovat, přenášet a sčítat průtok v uzavřených trubkách. K dispozici má 300 000 bodů zápisu, výstup 4-20mA, deseti číslicový totalizér, provoz funguje na AC/DC a pomocí vestavěné dobíjecí baterie. Je vhodný pro monitorování vyrovnávacího toku nebo k řešení potíží s průtoky v potrubí. Je ideální na úplné vyhodnocení výkonu průtokoměrů a může být instalován, kalibrován a spuštěn v minutách. Lze jej použít pro projekty, kde není nutný trvalý průtokoměr nebo může dočasně nahradit průtokoměr nainstalovaný.

3.1.1 Montáž průtokoměru

Ultrazvukový snímač PDFM 5.1 se umísťuje na vnější straně potrubí. Akustický impuls se odráží zpátky do snímače z částic nebo plynů tekoucí tekutinou. Průtok libovolné kapaliny může být měřen tak dlouho, dokud obsahuje vzduchové bubliny nebo pevné látky. Je ideální pro odpadní vodu, kal a většinu chemikálií, kyselin, žiravin a mazacích kapalin. S jeho interní baterií lze průtokoměr provozovat celý den a poté dobít přes noc. Pro nepřetržité používání je možné ho napájet dodávaným zařízením. Obsahuje napájecí adaptér 110-240VAC. Uvnitř je zabudován datalogger 300 000 bodů.

Montáž snímače a úplná kalibrace může být provedena během několika minut. Na senzor se nanese přiložený gel a poté se průtokoměr namontuje na vnější stranu potrubí s držákem z nerezové oceli. Pomocí kalibračního systému se zadá průměr trubek a zvolí se měřicí jednotky (galony, litry apod.). Průtokoměr může okamžitě začít zobrazovat, vysílat a odečítat hodnoty. Po zvolení zobrazovacích jednotek průtokoměr zobrazí a součet objemu toku v litrech, gramech, kubických stopách nebo kubických metrech. Pokud jsou změněny jednotky, průtokoměr je automaticky přepočítá.

Záznamník dat ukládá čas a hodnoty průtoku po 10 sekundových až 5 minutových intervalech. Nebo lze použít formát 'Zpráva o toku', který zaznamenává celkový, minimální, maximální a průměrný průtok a ukládá je do hodinových nebo denních shrnutí. Protokoly toku lze přenést do počítače nebo notebooku prostřednictvím výstupu USB.

Doplňkový algoritmus průtoku odfiltruje hluk pozadí a rušení. Procesor digitálního signálu rozlišuje slabé a zkreslené signály. Pokud procesor nemůže přesně měřit, měřicí přístroj bude zobrazovat nulový tok a signalizuje nízkou spolehlivost signálu.

S vestavěnou dobíjecí baterií lze ovládat software průtokoměru až 18 hodin nepřetržitě.

Tabulka 1 Specifikace průtokoměru Greyline PDFM 5.1

Rozsah průtoku	$\pm 0,03$ až $12,2$ m / s ve většině aplikací
Velikost trubky	ultrazvukový senzor se montuje na jakoukoliv trubku od $12,5$ mm až $4,5$ m
Napájení	vestavěný akumulátor NiMH s nepřetržitým provozem až do 18 hodin, externí s 24 vstupní nabíječkou 100- 0VAC 50/60 Hz
Výstupy	4-20mA (500 ohmů) při napájení střídavým proudem, USB pro přenos datového protokolu přímým připojením k počítači
Data logger	programovatelná kapacita 300 000 datových bodů, datový nebo formátovaný tok včetně celkového, průměru, minima, maxima a časy výskytu průtoku
Provozní teplota	-23° až 60° C
Přesnost	$\pm 2\%$ vyžaduje minimální velikost pevných látek nebo bublin minimálně 100 mikronů a koncentraci 75 ppm. Opakovatelnost: $\pm 0.25\%$, Linearita: $\pm 0,5\%$
Výběr jazyka	angličtina, francouzština, španělština

Tabulka 2 Specifikace senzoru

Standardní model PSE4	Upínací, jednohlavá ultrazvuková pro potrubí od $12,5$ mm až $4,5$ m s dvojitý koaxiálním kabelem o průměru $3,4$ m
Montážní sada pro senzory:	Nerezová trubková svorka 150 g a silikon
Provozní teplota:	-40° C až 150° C

Průtokoměr Greyline PDFM 5.1 pracuje nejlépe s “obtížnými” kapalinami, které by poškodily běžné průtokoměry. Protože je snímač namontován na vnější straně potrubí, nedochází ke kontaktu s pohyblivou kapalinou. Snímač se připevní na vnější stranu potrubí o průměru 12,5 mm nebo větším a měří tok v běžných potrubích různých materiálů: PVC, uhlíková ocel, nerezová ocel, litina, sklolaminát a lemované potrubí, tedy jakákoliv potrubí, která vedou ultrazvuk. Dopplerové signály nemohou být přenášeny stěnami potrubí, které obsahují vzduchové kapsy (materiály jako beton a dřevo) nebo volné vložky (se vzduchovou mezerou mezi vložkou a stěnou potrubí).

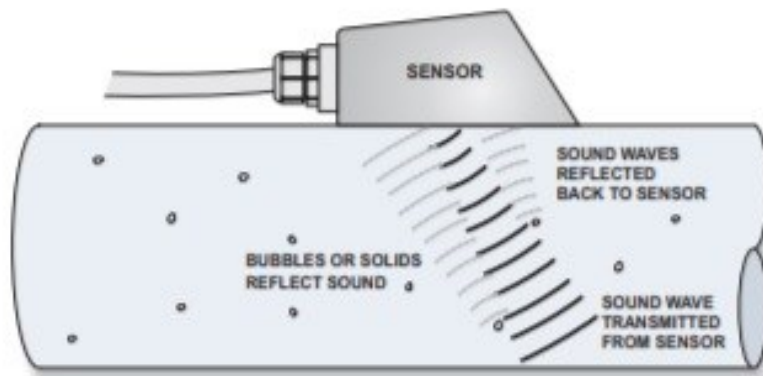


Obr. 16. Průtokoměr Greyline [19]

3.1.2 Princip měření průtokoměru

Ultrazvukový snímač PDFM 5.1 vysílá vysokofrekvenční zvuk přes stěnu trubky do tekoucí tekutiny. Plynové bubliny nebo pevné látky rozprostřené v kapalině odrážejí ultrazvukový signál zpět do snímače. Když se tento zvuk odrazí od pohybu bublin nebo částic

vrátí se zpět na snímač při změněné frekvenci. Tento posun frekvence se nazývá Dopplerův jev. PDFM 5.1 nepřetržitě měří změnu frekvence a z ní přesně vypočítá průtok.

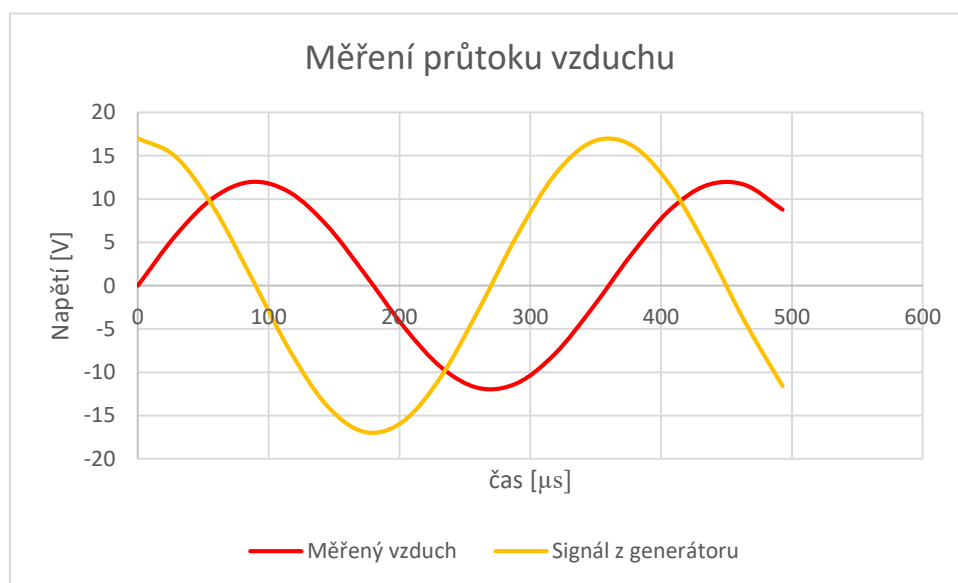


Obr. 17. Princip měření průtokoměrem Greyline [19]

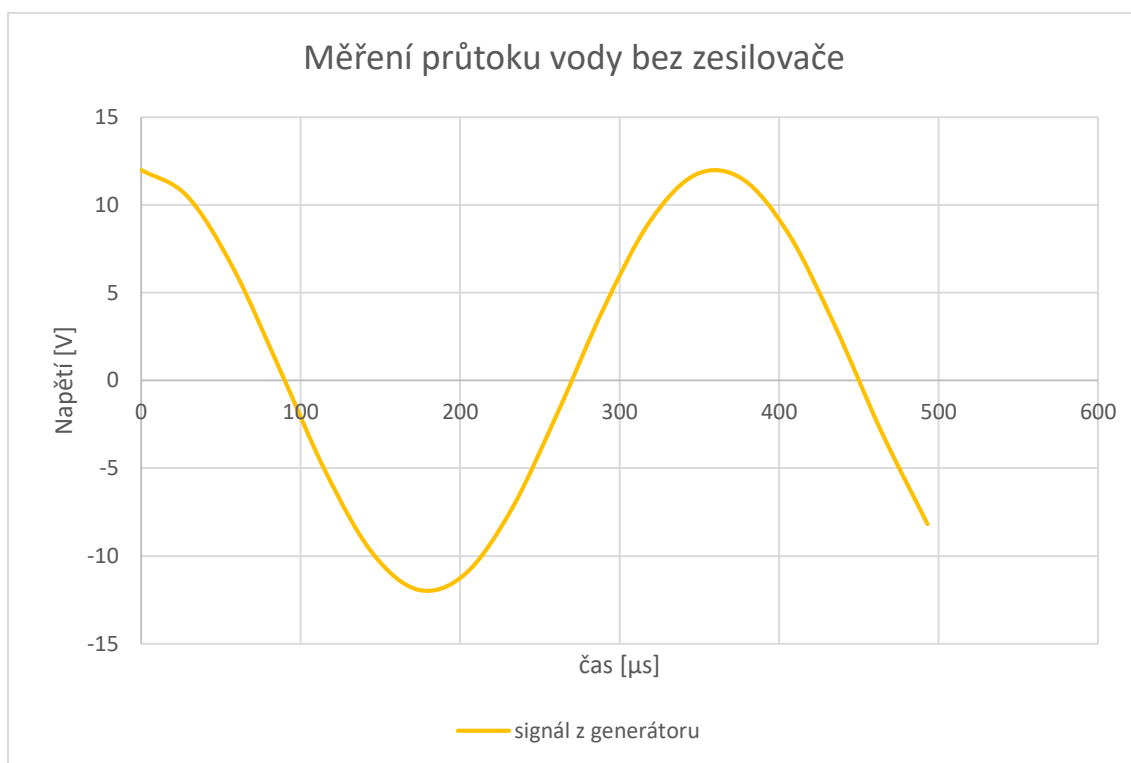
4 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ

V mé bakalářské práci jsem zhotovil ultrazvukový průtokoměr, jehož tělo bylo zhotoveno na 3D tiskárně, přičemž byl použit PLA materiál, který je možné barvit i vrtat. V konstrukci byly umístěny voděodolné transceivery značky Multicomp, které pracují na kmitočtu 58 KHz. Byla sestavena měřicí soustava, která obsahovala: osciloskop, generátor, laboratorní zdroj, nádobu na vodu, držák a čerpadlo. Po sestavení a uvedení do provozu jak soustavy, tak průtokoměru, byla provedena 3 samostatná měření. První měření proběhlo bez vody pouze se vzduchem a výstupní hodnoty byly dobré. Druhé měření již proběhlo s vodou. Měřicí soustava zůstala stejná, ale výstupy na osciloskopu nebyly zjištěny žádné. Výstupní hodnota tedy byla nula. Pro vyřešení problému se musel připojit zesilovač k zesílení signálů. Přistoupilo se tedy k třetímu měření, které bylo naprosto stejné jako druhé měření bez zesilovače. V třetím měření byly díky zesilovači zaznamenané výstupní hodnoty na osciloskopu. Výstupní hodnoty dosahovaly 8.5 V a ve špičce 12,5 V. Tyto hodnoty byly velmi podobné jako hodnoty při prvním měření, které proběhlo se vzduchem. Na všech třech měřeních se projevil určité nedostatky, se kterými se musí pracovat k bezproblémovému chodu průtokoměru. Byla navržena různá opatření a to: vytisknout tělo průtokoměru na lepší kvalitu a použít lepší materiál. Vyzkoušet použití voděodolných transceiveru na kmitočtu 40 KHz a použít výkonnější zesilovač s propojením s transformátorem.

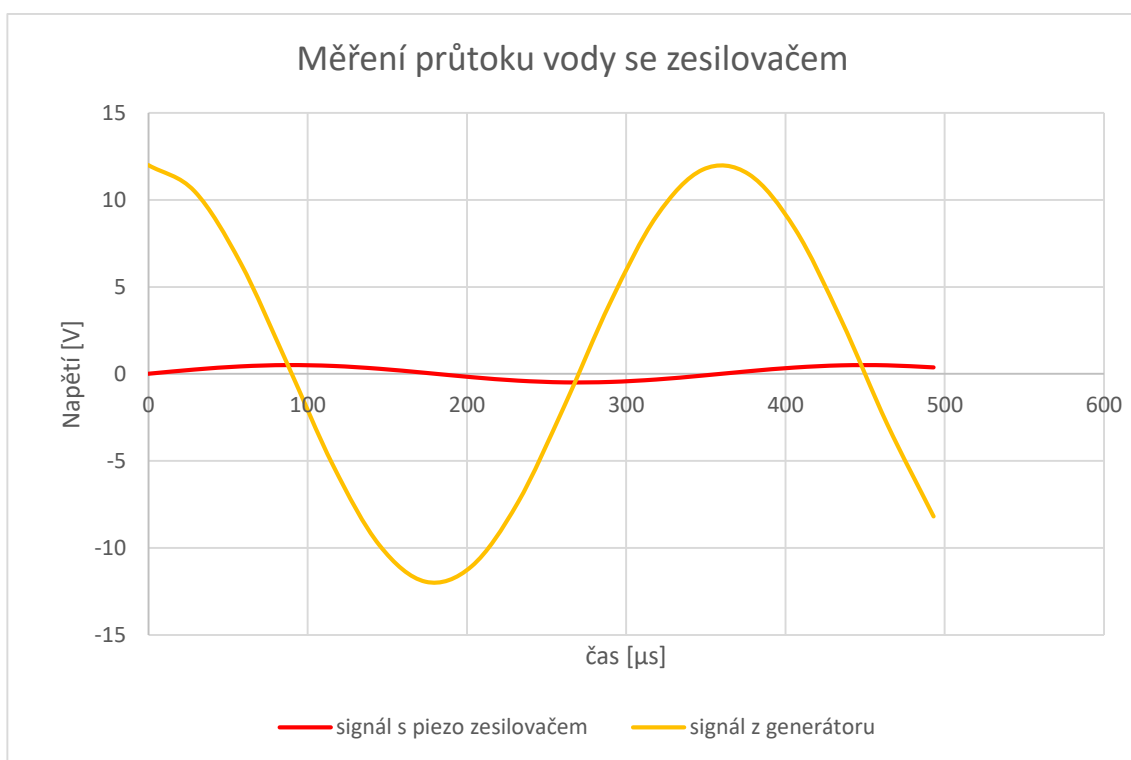
Závěr měření v grafu:



Graf 1 Měření průtoku vzduchu



Graf 2 Měření průtoku vody bez zesilovače



Graf 3 Měření průtoku vody se zesilovačem

4. 1 Konstrukce průtokoměru

V prvním kroku se přistoupilo k sestrojení průtokoměru. Průtokoměr je vytisknut na 3D tiskárně a skládá se ze tří částí – z dvou částí, které slouží jako začátek a konec průtokoměru. V těchto dvou částech jsou umístěny transceivery a vývody k proudění kapaliny. Mezi tyto dvě části patří třetí nejdelší část průtokoměru, která tvoří většinu průtokoměru. Do těchto dvou koncových částí se navrtaly otvory pro transceivery, které se vystředily na střed součásti. Potom se vývody od transceiveru pro připojení budícího signálu vložily skrz vyvrtané otvory a transceiver se přilepil ke dnu součásti. Tímto způsobem se sestavila jak začáteční tak i koncová část průtokoměru. Aby se zamezilo protékání vody skrz otvory, ve kterých jsou vloženy vývody od transceiveru, zalepily se volná místa, která zbyly po obvodu otvoru jak z vnější tak i z venkovní strany a poté se otestovala jejich těsnost. Test těsnosti proběhl tak, že se součást naplnila vodou a čekalo se, jestli voda proteče. Po tomto testu, kdy jsme se přesvědčili o správné těsnosti všech zalepených otvorů, jsme přistoupili k utěsnění všech tří částí průtokoměru. Každá část byla natřena jak z vnitřní tak i z venkovní strany bílou akrylátovou barvou jako barvou základní a poté finální modrou akrylátovou barvou. Obě barvy, které byly použity jsou značky Tamyja. Tyto barvy se používají zejména v modelářství a pro naše účely jsou plně dostačující. Po zaschnutí barev se přistoupilo k lakování každé části. Byl použit lak značky Sidolux, který se používá na lakování parket a PVC apod. Tímto se docílilo úplné těsnosti povrchu. Po dokončení těchto úkonů se přistoupilo ke slepení všech tří částí do finálního celku. Použilo se dvousložkové lepidlo používané rovněž v modelářství. Po slepení všech částí došlo ještě k přetření všech slepovaných spojů a jednomu finálnímu lakování celého průtokoměru.



Obr. 18. Průtokoměr



Obr. 19. Vnitřní barvení průtokoměru

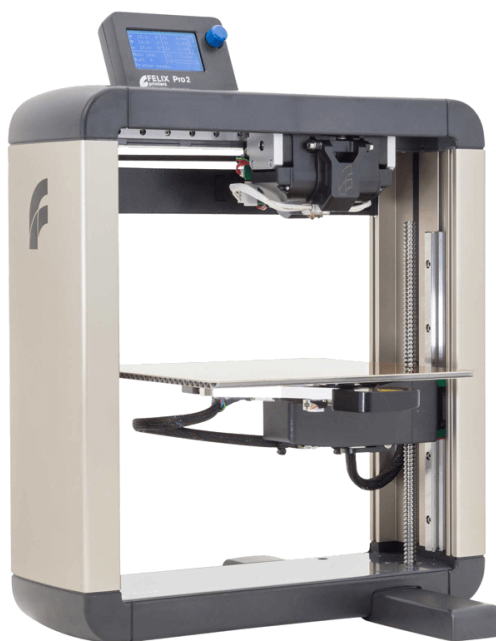
4.1 Návrh měřicího okruhu

Pro konstrukci průtokoměru a měřící soustavu byly použity následující přístroje:

- tiskárna 3D Felix 2 pro
- transceiver
- digitální osciloskop
- generátor - metex 9810A
- laboratorní zdroj DC – suply
- čerpadlo

Před samotným sestavením měřicího řetězce bylo nutné vytisknout tělo průtokoměru na 3D tiskárně. To bylo nejdříve vymodelováno pomocí programu Rhino, což je nejpoužívanější 3D program na světě. Jeho předností jsou především robustní modelovací nástroje na bázi NURBS. Pomocí těchto nástrojů lze vymodelovat i objekty, které jsou svým tvarem velmi komplikované. NURBS křivky se dají měnit až k výslednému tvaru tělesa, který uživatel požaduje. Rhino je nejlepší variantou pro konstruktéry, automobilové designéry či šperkaře. Od tohoto programu se dají čekat přesné modely a součástí je i výkresová dokumentace, která zahrnuje automatickou tvorbu 2D pohledů z 3D modelů, kótování, tvorbu čar, či šrafování. Program dále obsahuje vizualizaci – vizualizační jádro, které umí vypracovat jak schématické výstupy v barevném stínování, tak i jednodušší fotorealistické vizualizace.

K tisku byla použita tiskárna 3D Felix Pro 2. Tato tiskárna se vyznačuje vynikající kvalitou tisku, má automatickou kalibraci podložky, čímž je zajištěn nejlepší tiskový výstup. Má detekci konce tiskové struny, takže tiskárna počká na doplnění a je možné pokračovat v tisku dál. Je zde také inteligentní pozice tiskových hlav a vyhřívaná podložka. Díky celokovovým extruderům je možné při ucpání tiskové trysky tiskovou hlavu odmontovat jedním kliknutím a pokračovat v tisku. Nejvyšší tisková teplota je 275°C a používají se tiskové struny o průměru 1,75 mm. Je možné použít různé tiskové materiály jako např. PLA, ABS, H-PLA, PVA, PVC a další.



Obr. 20. 3D tiskárna FELIX PRO 2 [18]

PLA materiál je biologický a dobře rozložitelný a vyznačuje se snadným tiskem. Používá se k tisku větších objektů. Materiál PLA nelze strojově opracovávat, ale je možné ho lakovat, barvit či vrtat. Tento materiál měkne při teplotě nad 50 stupňů Celsia. Nevýhodou PLA materiálu je nižší teplotní odolnost.

ABS materiál je termoplast na bázi oleje. ABS se běžně používá u potrubních systémů, ale i v automobilovém průmyslu či hraček. Věci, které se tisknou materiálem ABS, se vyznačují vyšší pevností, pružností než materiál PLA. Tento bonus je na úkor komplikovanějšího tisku. Nevýhodou tohoto materiálu je jeho vysoká smrštitelnost.

Na tisk průtokoměru byl použit materiál H-PLA.

Tabulka 3 Parametry pro tisk s materiálem PLA a ABS [25]

Název parametru	PLA	ABS
Maximální velikost objektu	Bez omezení	80 mm
Teplota pro základní mřížku	195°C	235°C
Teplota pro Interface	195°C	235°C
Teplota pro tisk – první vrstva	200°C	ABS Natural - 230°C ABS Barvené - 232°C
Teplota pro tisk – běžné vrstvy	210-220 °C	ABS Natural - 240-245°C ABS Barvené - 243-248°C
Rychlost tisku – malé objekty (do 80 mm)	Až 30 mm/sec	16-20 mm/sec
Rychlost posunu extruderu – malé objekty	Až 60 RPM	26-36mm/sec - 38-46 RPM
Rychlost tisku – větší objekty	20 mm/sec	10-12mm/sec
Rychlost posunu extruderu – větší objekty	48 RPM	16-22mm/sec 30-38 RPM

H-PLA je nový materiál, který převzal ty nejlepší vlastnosti z materiálu ABS a PLA. H-PLA se vyznačuje velmi nízkou teplotní roztažností a proto tiskne velmi přesné větší modely, které odolávají teplotám až 100 °C. Stejně jako PLA materiál je tento materiál tvrdý a vyznačuje se vysokou houževnatostí jako ABS. Má stabilnější strukturu a při tisku byl nastaven překryv, který se přibližně 10% vrývá do předešlé vrstvy, čímž se zabezpečuje větší neprodyšnost materiálu. Tisk byl nastaven na pomalý chod, což odpovídá přibližně 50 % chodu tiskárny. Tímto se dosáhlo kvalitnějšího tisku.

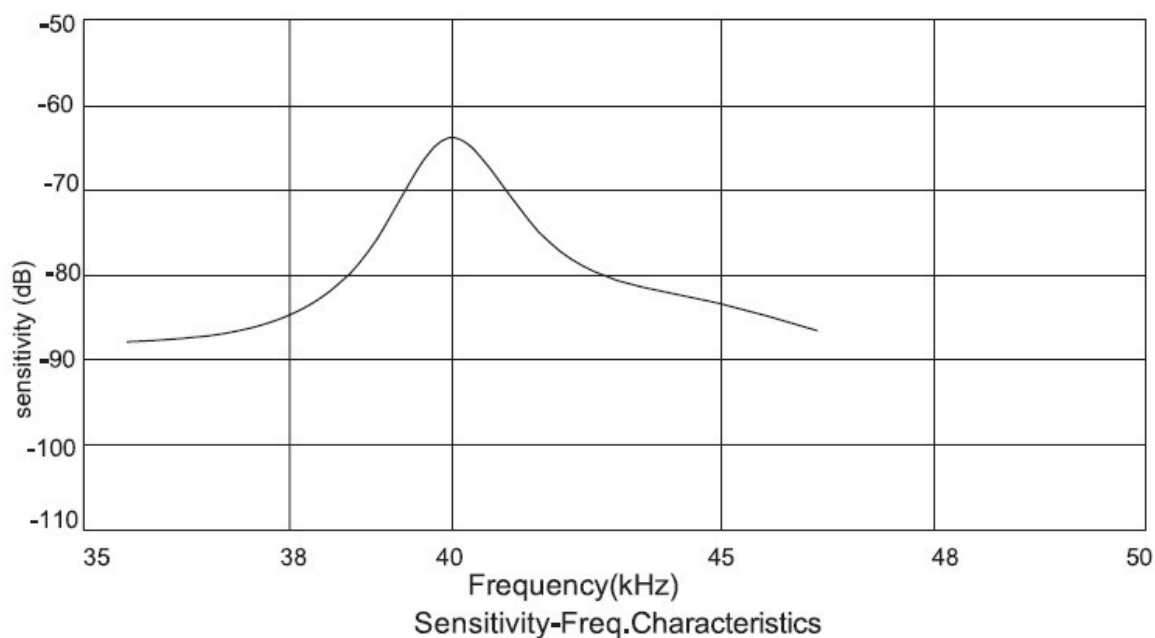


Obr. 21. Transceiver v průtokoměru

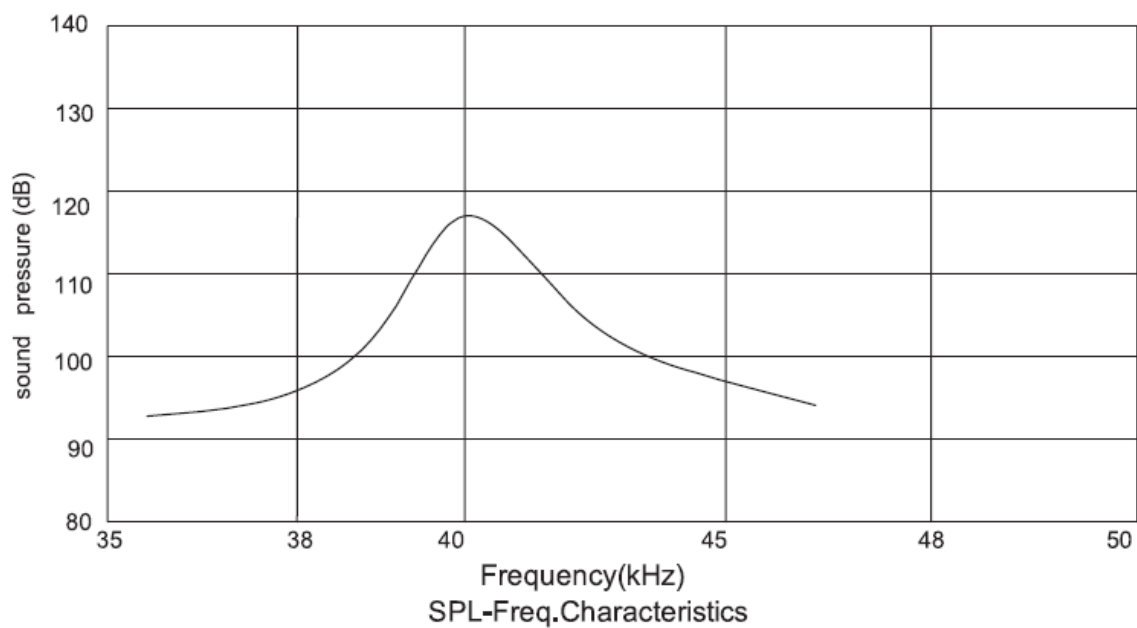
Po zhotovení konstrukce průtokoměru bylo nutné zakomponovat transceiver, který je nedílnou a neméně podstatnou součástí měřicí soustavy. V tomto případě byl použit transceiver značky MULTICOMP, což je piezoelektrický ultrazvukový senzor, který se skládá z vysílacího a přijímacího zařízení. Tento transceiver pracuje na kmitočtu 40 kHz s voděodolnými stěnami. Princip použitých transceiverů spočívá v tom, že je v měřidle umístěn přijímač a vysílač. Ultrazvukový signál se po vyslání z transceiveru pohybuje rychleji ve směru toku látky, než proti němu. Doba prodlevy mezi těmito signály je poté přímo úměrná rychlosti průtoku. Doba prodlevy se měří v krátkých intervalech. Pro generování zvukových vln při měření se využívá piezoelektrického jevu. Tento jev je způsoben piezoelektrickým krystalem, který se při přivedení napětí deformuje. Jakmile se na krystal v senzoru přivede napětí, dojde k jeho smrštění a vytvoření vibrací a tím i zvukových vln. Tyto vlny se šíří, a když narazí do překážky, odrazí se zpět do snímače. Pro šíření ultrazvukových vln je nutné i vhodné prostředí. Lze je použít v kapalině či ve vzduchu, ale ne ve vakuu.

Tabulka 4 Technická specifikace snímače MCUSD14A58S9RS-30C 2 [26]

Značka	MULTICOMP
Konstrukce	Vodotěsná
Použitá metoda	Duální metoda
Středový kmitočet	40 ± 1 kHz
Hladina akustického tlaku (dB)	min.110dB (40kHz) 0dB = 0.0002 μ bar
Citlivost	min.-65dB/V/ μ bar
Vzor paprsku	110 x 50 °
Kapacita (pF)	2,500pF \pm 25% při 1kHz
Rozsah provozních teplot	-35 °C až 85 °C
Rozsah skladovací teploty	-35 °C až 85 °C
Materiál pouzdra	hliník



Graf 4 Citlivost snímače



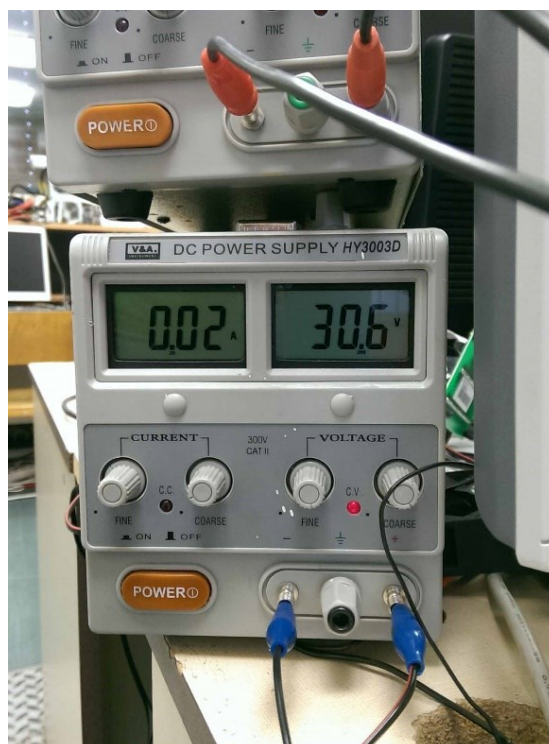
Graf 5 Hladina akustického tlaku

Dále se v měřicí soustavě použil generátor METEX MXG-9810-A. Generátor s čítačem je použit jako zdroj střídavého signálu se sinusovým či pilovitým průběhem. K určení frekvence periodického signálu slouží čítač. Generátor vytváří signály s frekvencí řádově do stovek MHz.



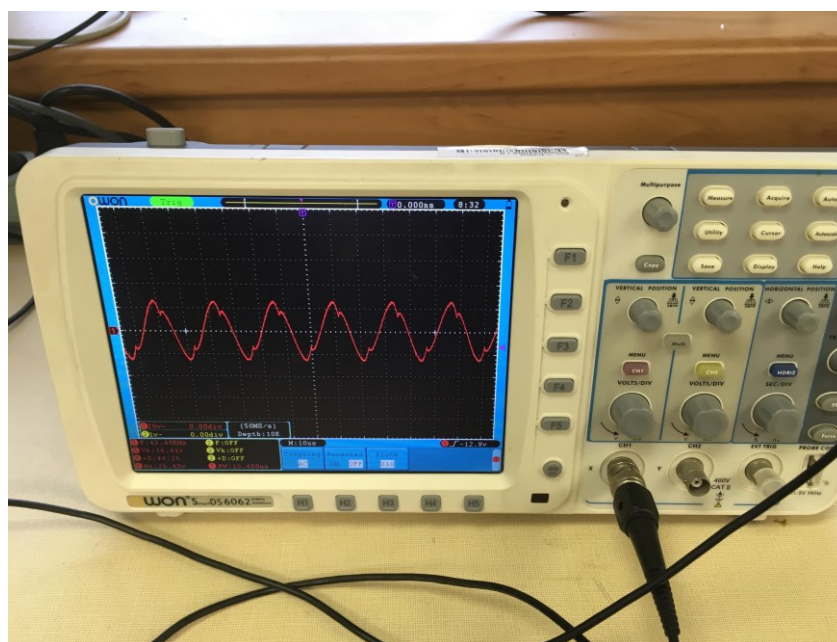
Obr. 22. Generátor METEX

Byl použit i zdroj DC power supply.



Obr. 23. Laboratorní zdroj DC Power Supply

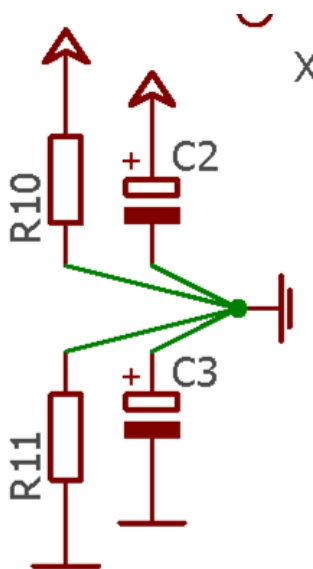
V sestavě byl použit dvoukanálový digitální osciloskop OWON SDS Série 6062. Osciloskop v sestavě slouží k zobrazení viditelného záznamu měřitelného výstupu. Šířka pásma je 60 MHz a vzorkování 500 MS/s nebo 250 MS/s pro oba kanály.



Obr. 24. Osciloskop OWON SDS 6062

Zesilovač

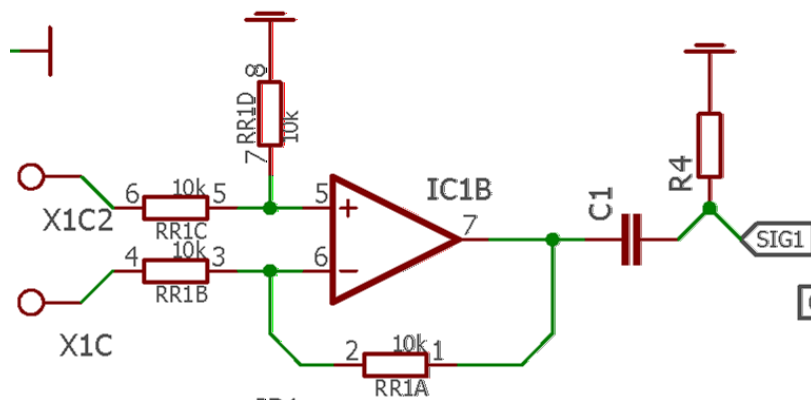
Zesilovač pro ultrazvukový senzor se skládá ze tří hlavních částí. Zdrojová část, vstupní přizpůsobovací část a výstupní výkonová část. Zdrojová část se skládá z odporů R10, R11 a kondenzátorů C2 a C3. Toto zapojení se chová jako pasivní dolní propust, která minimalizuje rušení z hlavní napájecí větve. Zdrojová část slouží pouze pro vytvoření virtuálního vztažného bodu pro operační zesilovače. Pro zjednodušení obvodového schématu bylo použito jednoduché napájení a ne symetrické, které je potřeba. Virtuální střed tedy umožňuje simulovat symetrické napájecí napětí. Napájecí napětí je možné použít až 24 V s tím, že je nutné použít správně dimenzované kondenzátory na alespoň 35 V. SMD odpory a keramické kondenzátory jsou dimenzovány na minimálně 50 V již od výroby.



Obr. 25. Zdrojová část a kondenzátor

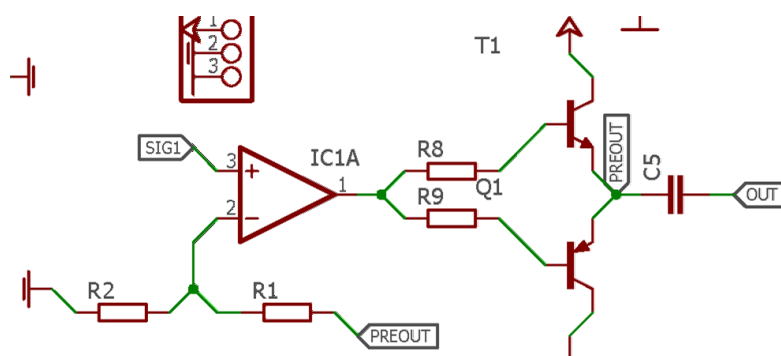
Vstupní přizpůsobovací část je tvořena operačním zesilovačem IC1B, výstupním filtrem C1, R4 a vstupní rezistorovou sítí RR1. Rezistorová síť je tvořena jediným čtyřnásobným rezistorem v pouzdru SMD. Toho se s výhodou používá v aplikacích s minimálními nároky na velikost plošného spoje a také pro minimalizaci rušení. Operační zesilovač je zapojen jako diferenční. Tuto variantu bylo nutné použít z toho důvodu, že zdroj signálu (Matlab, generátor...) mají signál vztažen k nulovému potenciálu, což by v tomto případě zkratovalo odpor R11 napájecí části a bylo by nutné použít symetrický zdroj napájení. Kondenzátor C1 a odpor R4 slouží pro oddělení stejnosměrné složky signálu.

Výstupní výkonová část se skládá z operačního zesilovače IC1A, zpětnovazebních rezistorů R1, R2, dvojice bipolárních tranzistorů T1, Q1 a kondenzátoru C5. Operační zesilovač je zapojen jako neinvertující se zesílení $1+R1/R2$.



Obr. 26. Vstupní přizpůsobovací část

Vstupem je signál z přizpůsobovací části vztažený k virtuálnímu středovému potenciálu. Na výstupu výkonové části je tedy polovina napájecího napětí, pokud není na vstup přiveden žádný signál. Odporů R8, R9 jsou báze a definují pracovní oblast tranzistorů. Kondenzátor C5 slouží pro oddělení stejnosměrné složky signálu. Výstupní transformátor je připojen mezi tento kondenzátor a výkonovou zem (GND).

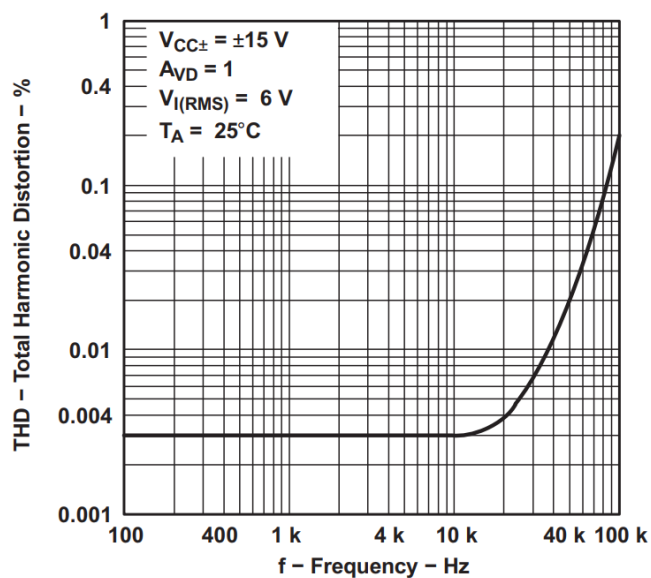


Obr. 27. Výstupní výkonová část

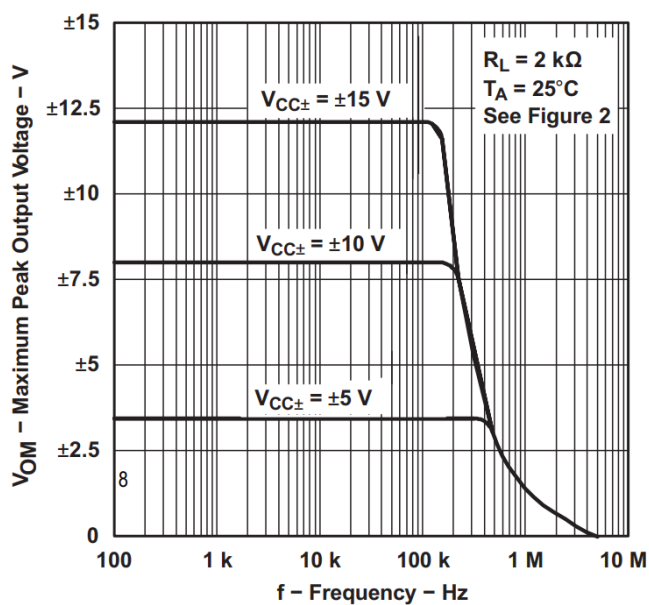
LED1 indikuje přítomnost napájecího napětí, kondenzátor C4 slouží jako jednoduchý filtr napájecího napětí. Použitý operační zesilovač, TL072, je standardní, volně dostupný, levný, prověřený integrovaný obvod. Jeho frekvenční charakteristika je na obrázku (Obr. 28.). Vzhledem k tomu, že se pohybujeme v oblasti 40 kHz, je maximální rozkmit výstupního napětí neomezený (Obr. 29.). Jeho zkreslení je také zanedbatelné, protože požadujeme na

výstupu sinusový, nebo pravoúhlý signál s maximálním rozkmitem. Nejedná se o zesilovač audio signálů, kde by zkreslení hrálo zásadní roli.

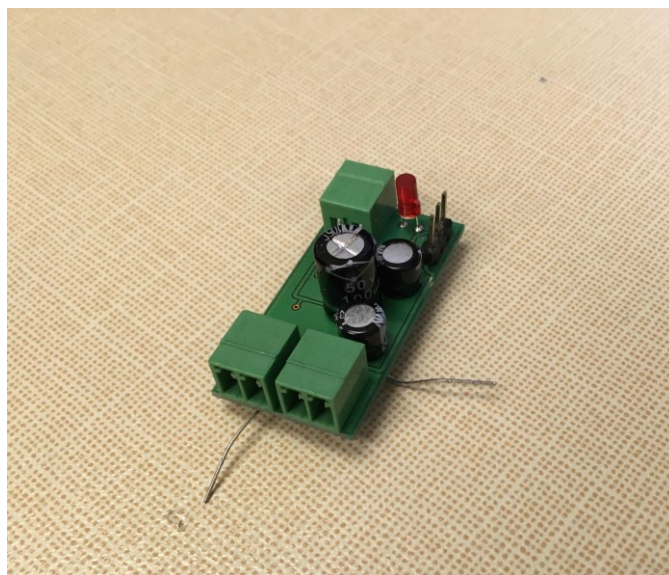
Tento zesilovač byl vyroben a navržen ve spolupráci s doc. Ing. Robertem Frischerem, Ph.D. Navrhnutí zesilovače trvalo dva dny a jeden den trvalo jeho osazení.



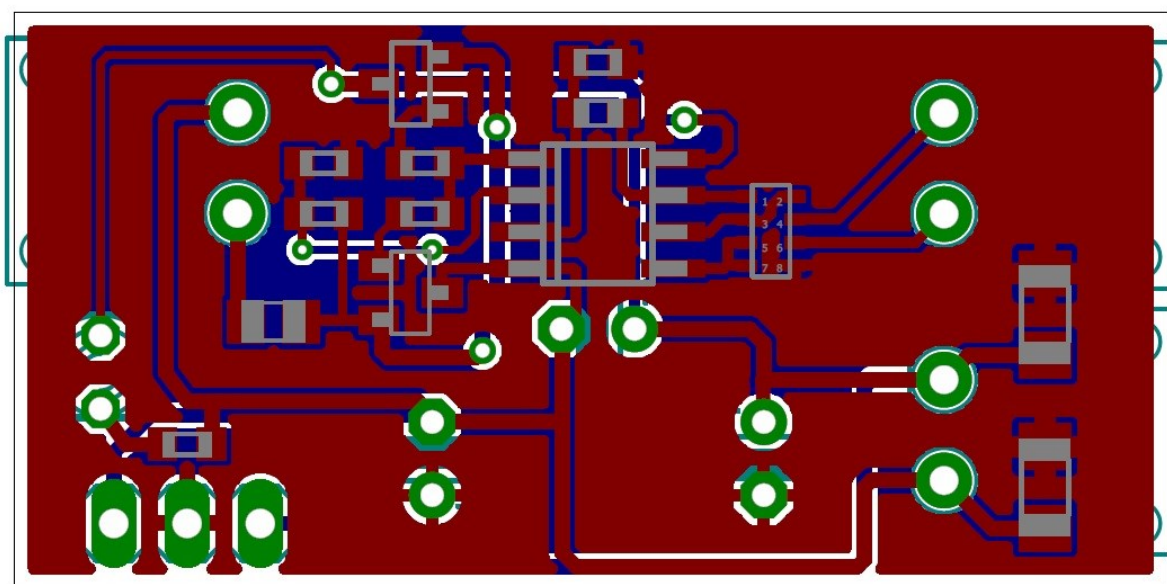
Obr. 28. Frekvenční charakteristika operačního zesilovače



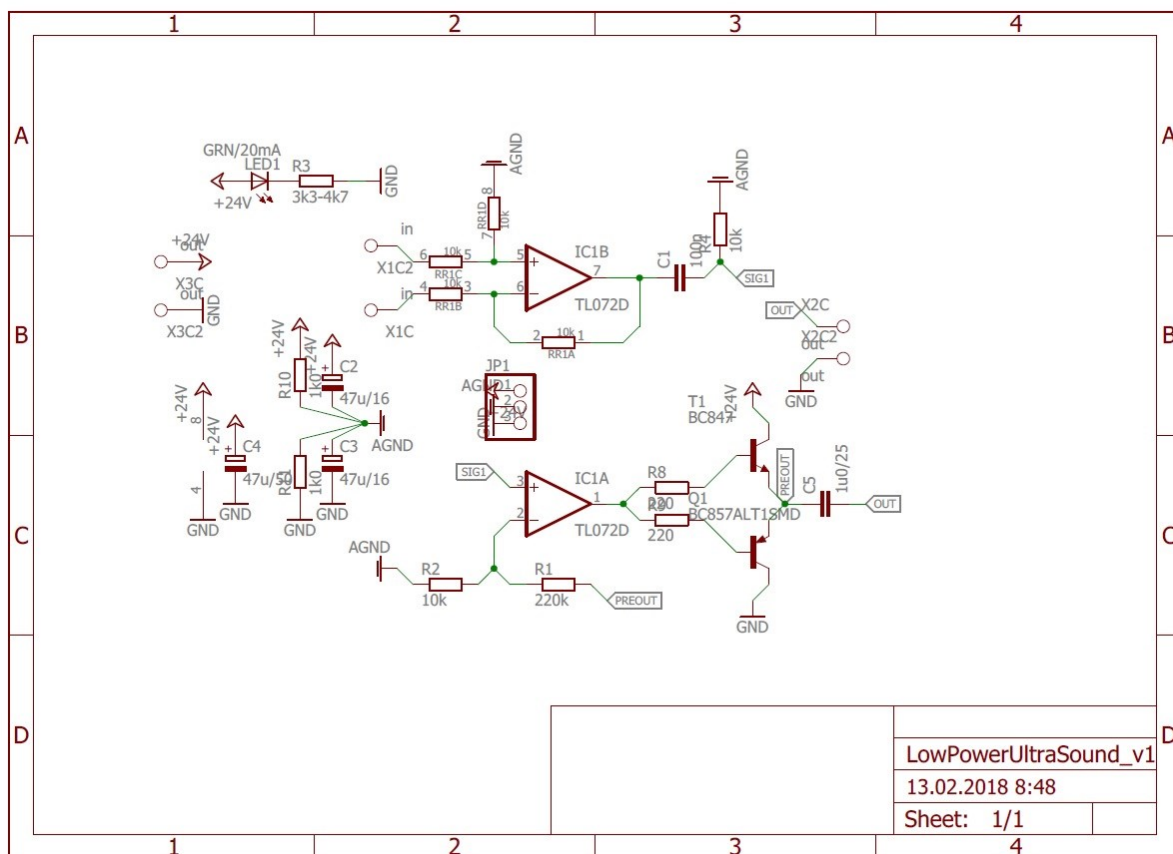
Obr. 2. Maximální rozkmit



Obr. 30. Zesilovač

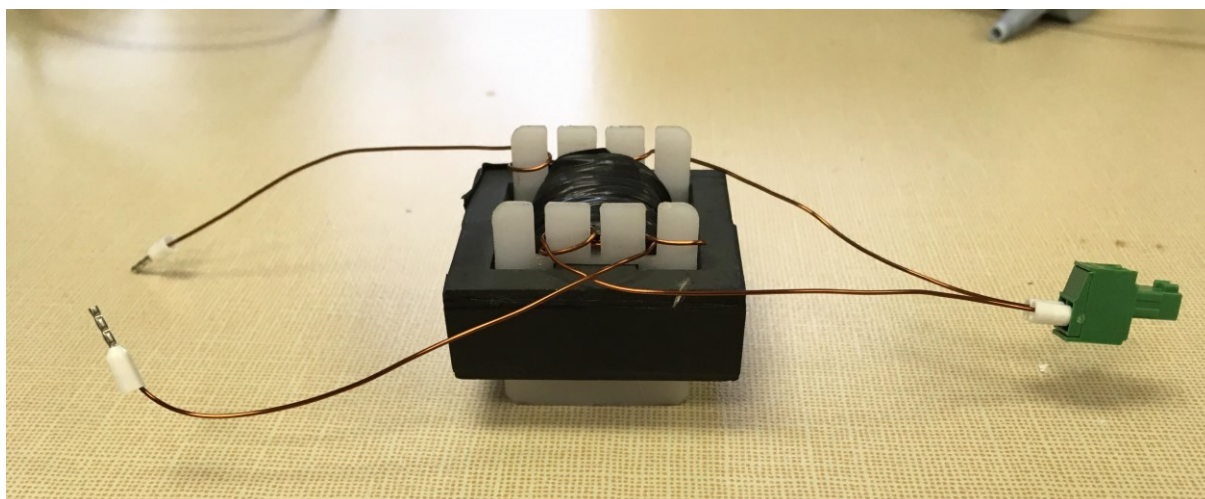


Obr. 31. Základní deska zesilovače



Obr. 32. Schéma zesilovače

Dále je součástí soustavy transformátor. Ten funguje jako měnič střídavého napětí. Je složen ze tří částí - vinutí, magnetický obvod a izolační systém. Primární vinutí převádí elektrickou energii na magnetickou. Procházejícím proudem se vytvoří magnetický tok. Tento magnetický tok je dále veden magnetickým obvodem k sekundární cívce. Magnetický obvod zajišťuje, aby co nejvíce magnetických siločar prošlo zároveň primární i sekundární cívkou. Použitý transformátor je zkonstruovaný na výkon 200-250 wattů a je zhotoven z feritového materiálu. U primárního vinutí byl použit drát o průměru 0,5mm, přičemž se jím namotalo 8 závitů. Přes těchto 8 závitů se namotalo 100 závitů sekundárního vinutí. Tímto bylo docíleno poměru 100:8. V případě pulzního napětí 1V na vstupu, bude na výstupu hodnota 12,5x větší. Tímto bylo docíleno dostačujících hodnot k buzení piezoelektrického měniče, který funguje pouze na vysokých frekvencích. Z tohoto důvodu nelze použít standardní transformátory, které jsou běžně k dostání.

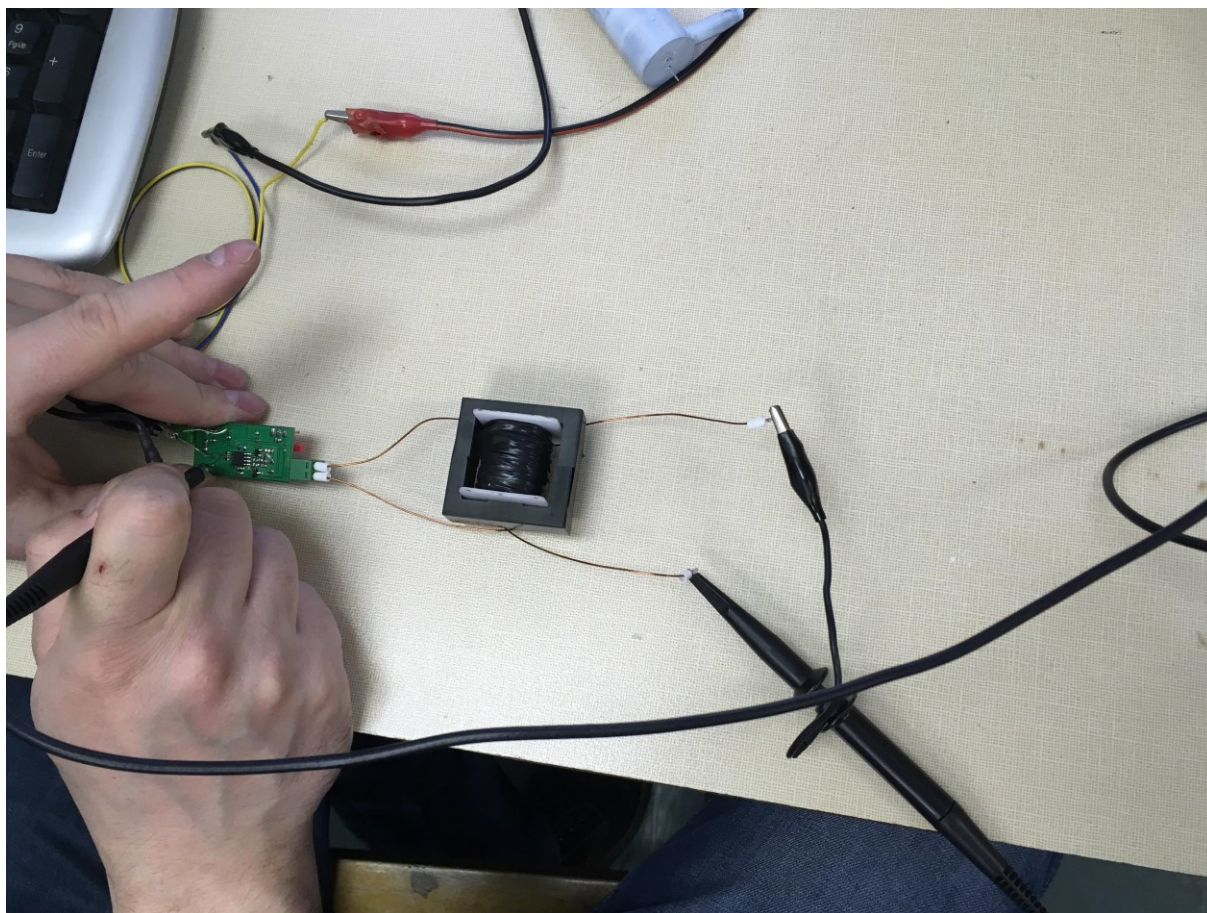


Obr. 33. Transformátor

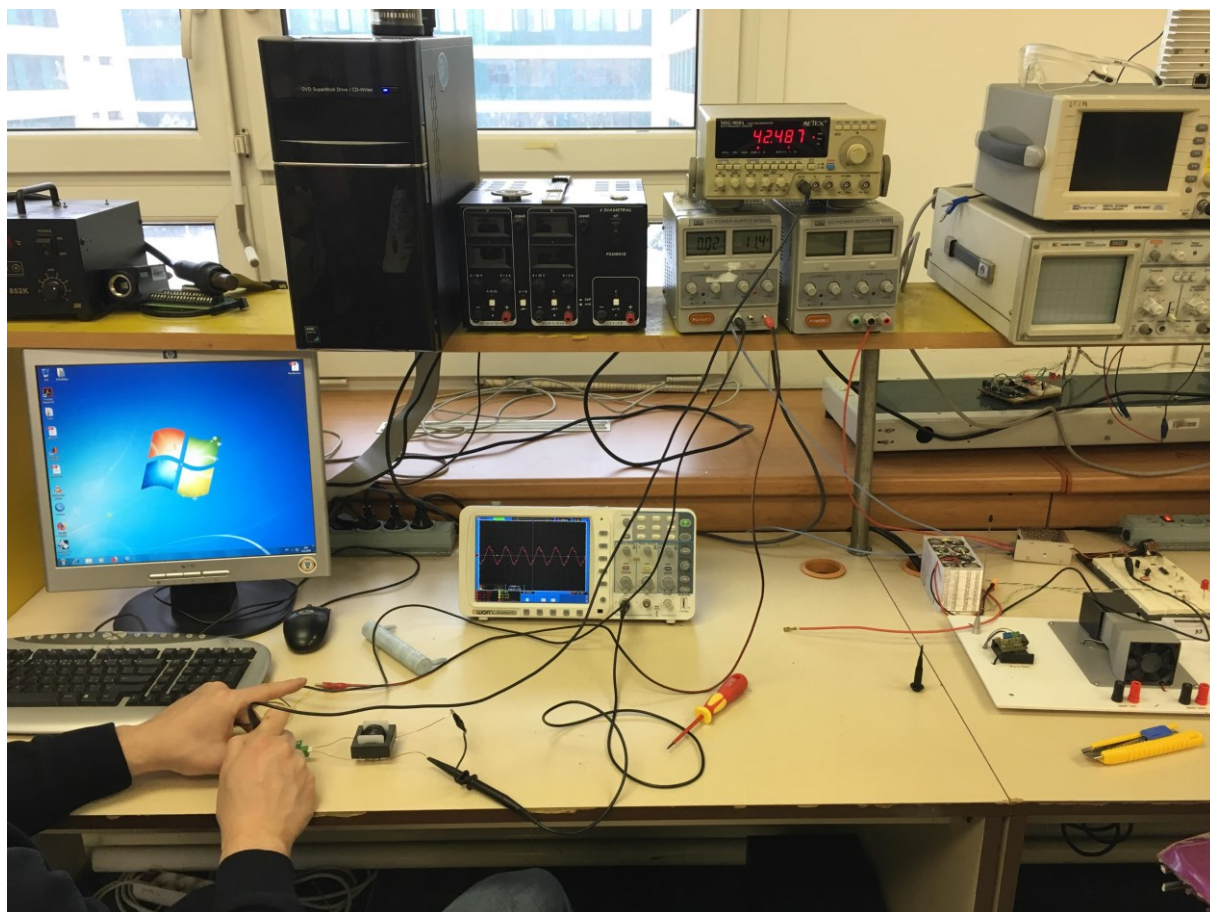
4.2 Testování funkčnosti zesilovače s transformátorem

Prvním krokem k měření bylo otestování funkčnosti zesilovače s transformátorem. Test měl potvrdit, zda propojení těchto dvou komponentů zvedne výstupní napětí 12,5 krát více, než bylo přivedeno na vstup. Při prvním pokusu se nastavilo na laboratorním zdroji napětí 8V a odběr proudu byl 10 mA. Toto byl uspokojivý výsledek. Výsledek byl překontrolován na osciloskopu, který neměl ukazovat žádné hodnoty, což se také potvrdilo. Mohlo se tedy přistoupit k připojení generátoru do sestavy. Generátor byl nastaven na hodnotu 40 000 Hz. Výsledek tohoto měření ukázal na výstupu hodnotu 150 V při napájení 11,4 V. Tento výsledek byl pro naše účely plně dostačující a naměřené hodnoty ukazovaly

výstupní hodnoty o 12,5 krát větší. Tímto testem se ověřila funkčnost transformátoru, tedy to, že pracuje přesně podle poměru vinutí. Tímto krokem bylo ukončeno testování zesilovače s transformátorem. Výsledky prokázaly, že zesilovač je plně funkční a je možné s těmito komponenty nadále pracovat. Tento test byl důležitý z toho důvodu, aby bylo dostatečné buzení pro piezoelektrické senzory.



Obr. 34. Propojení zesilovače s transformátorem

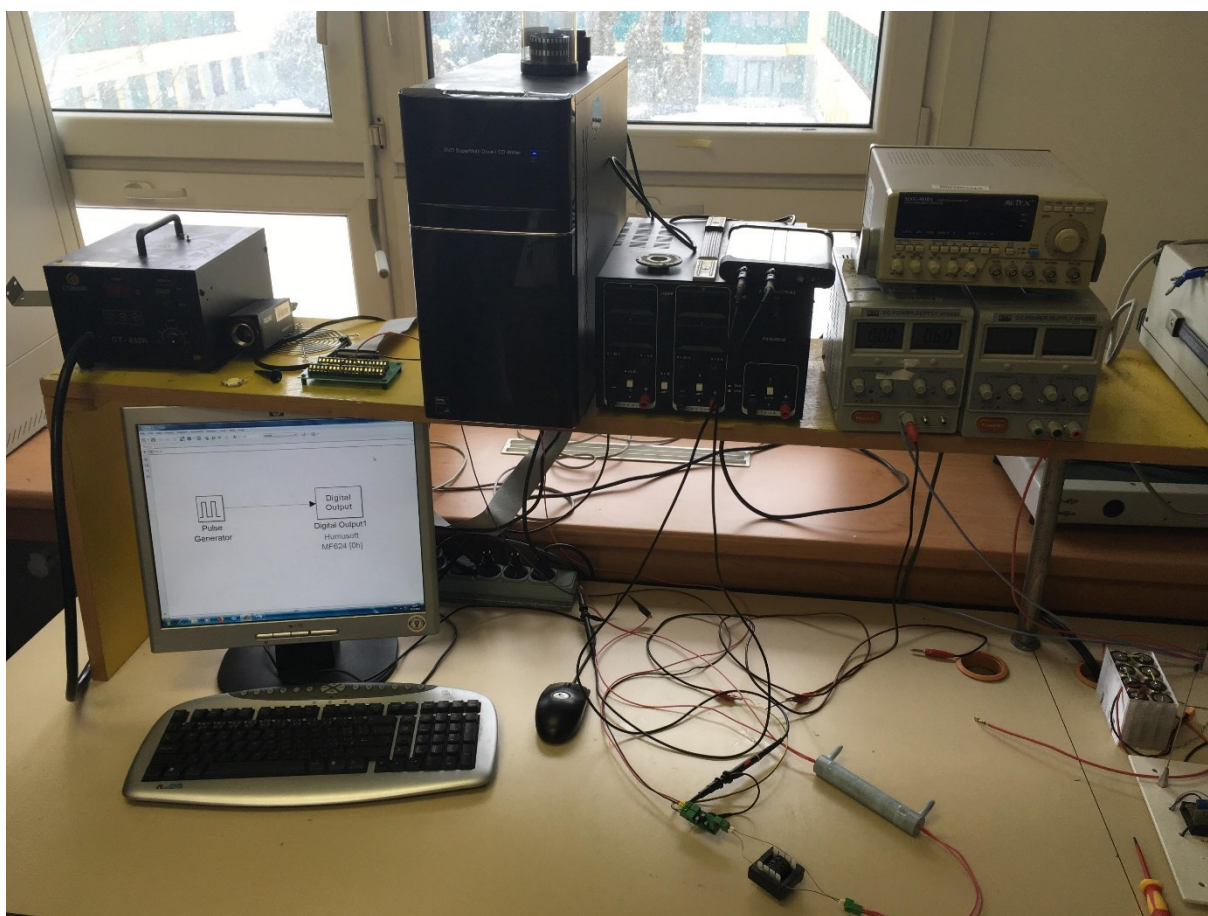


Obr. 35. Měřicí soustava

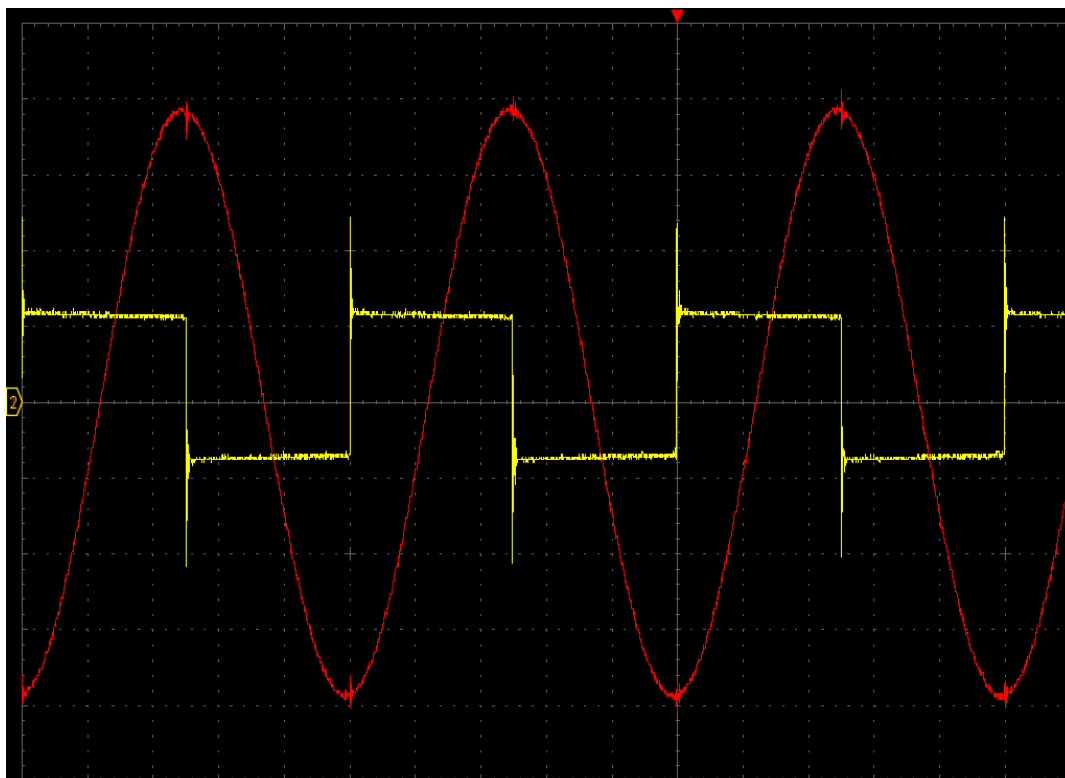
4.3 Test průtokoměru se vzduchem

Dalším a důležitým krokem bylo testování průtokoměru se vzduchem. Do sestavy byl přidán digitální osciloskop značky OWON VDS 1022 připojený na USB. V sestavě se také začal testovat i vyrobený průtokoměr. Na jeden konec průtokoměru brán jako vstup, byly připojeny kabely na vývody transceiveru a zde byly hodnoty generovány pomocí programu MATLAB. A z protějšího konce brán jako výstup, kabely z průtokoměru směřovaly do digitálního osciloskopu. Tímto zapojením byl měřen vstup, který byl veden do zesilovače a taktéž měřen výstup, který vycházel ze senzoru. Tímto měřením se měřil úplný začátek až po úplný konec sestavy včetně průchodu vzduchem. Toto měření již bylo zkoušeno s programem MATLAB. MATLAB obsahoval nastavbu Simulink, v němž jsou dva bloky. Jeden blok je pulzní generátor, který je propojen do digitálního výstupu. Uvnitř počítače je speciální měřicí digitální karta, kterou program MATLAB může ovládat. V pulzním generátoru byla nastavena hodnota 40 kHz jako pravoúhlé impulzy. Tyto impulzy vychází ven jako digitální výstup.

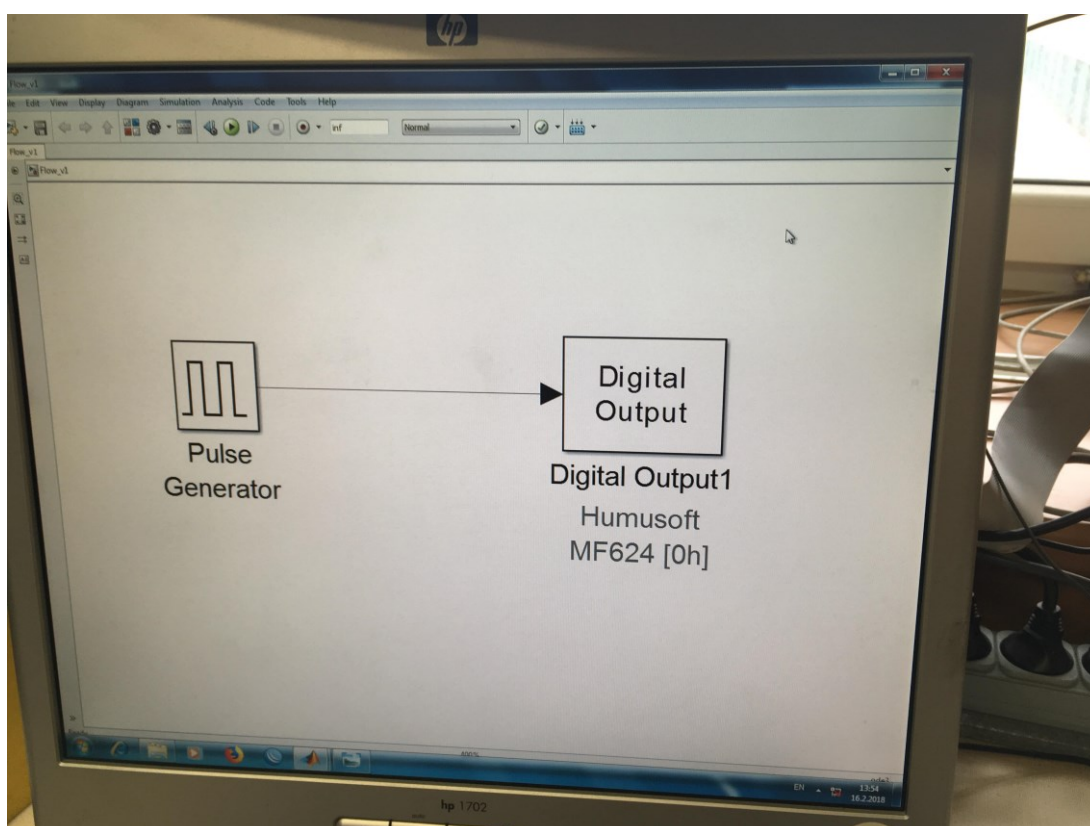
Tento digitální výstup jde jako vstup do zesilovače a dochází k jeho měření. Vstupní signál zesilujeme na napětí 6V a transformujeme na hodnotu 52 V. Výsledky prvního zapojení všech nových komponentů do sestavy ukazovaly, že vstupní hodnoty jsou 40 kHz a jako vstupní hodnoty je sinusoida a amplituda nám ukazuje hodnotu 2,3 V a hodnota 5 V nám znázorňuje rozkmit. Tento výsledek se v našem měření může považovat za velmi dobrý. Tímto měřením jsme ověřili, že na výstupu máme opravdu signál a tímto sestava reaguje a pracuje. Transceivery jsou buzeny dostatečně a tím pracují rovněž správně a generují přesně podle očekávání. Potvrdilo se nám i vyšší napětí, bez kterého by to celé nemělo smysl. Tímto víme, že pokud generujeme MATLABEM, tak veškerá činnost je v pořádku a pokud se přidal k měření transformátor, tak hodnoty jsou taktéž správné a vše pracuje spolehlivě.



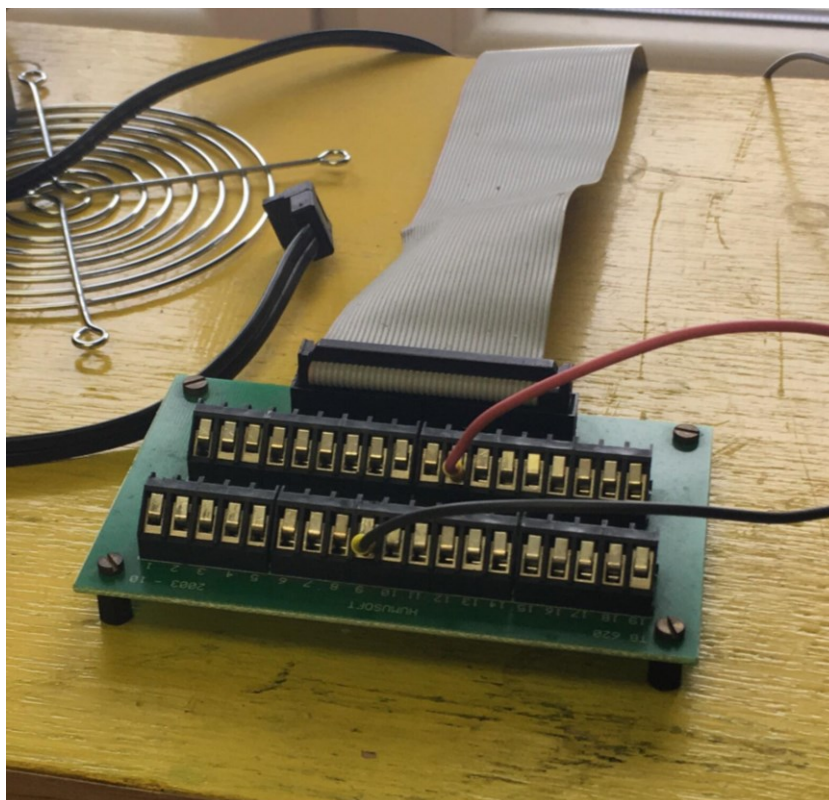
Obr. 36. Měření se vzduchem



Obr. 37. Výsledné hodnoty měření se vzduchem



Obr. 38. MATLAB



Obr. 39. Digitální karta

Těmito kroky, což byly sestavení průtokoměru, zesilovače a transformátoru a následně přidání digitálního osciloskopu a programu MATLAB do sestavy jsme ukončili etapu přípravy měření. Tyto kroky byly důležité k potvrzení přechodu od přípravy k testování a tímto kladným výsledkem můžeme přejít k praktickému měření s vodou.

4.4 Test průtokoměru s vodou

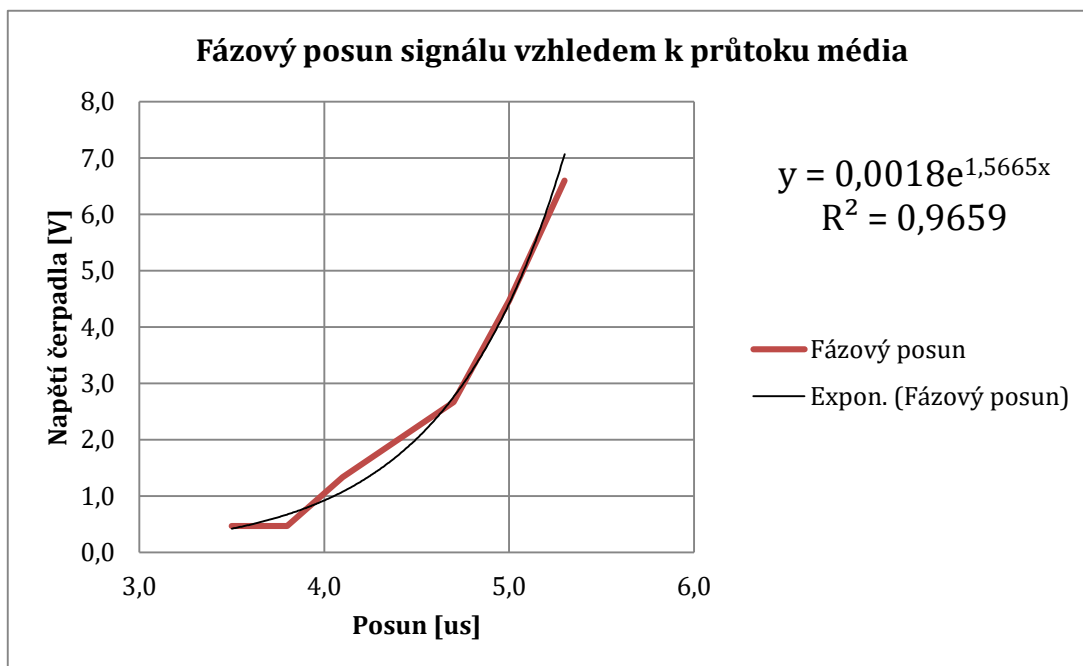
Finálním krokem byl test průtokoměru s vodou. Aby se tento krok mohl provést, musel se k měření použít vyrobený držák. Držák je uzpůsoben tak, aby na něj bylo možné upevnit všechny potřebné komponenty pro provedení testu. Na držák byl upevněn průtokoměr, čerpadlo, ze kterého vedly hadičky jak do průtokoměru, tak do nádoby s kapalinou. Kabeláží byly propojeny všechny komponenty tak, aby sestava byla kompletně zapojena a připravena k měření. Tímto vším se splnily podmínky pro test a přikročilo se k testu.

Na začátku testu bylo nutné otestovat čerpadlo, zda reaguje na změnu napětí. Do čerpadla bylo pouštěno napětí, a čím větší napětí do čerpadla šlo, tím se zvýšil i průtok. Čerpadlo správně reagovalo a mohlo se přejít k spuštění celého testu. Na začátku testu se do

čerpádla pouštělo napětí 3 V a na tomto napětí se vždy se provedly tři snímky s hodnotami pořízené na osciloskopu, které se rovnou ukládaly na USB flash disk. Další postup bylo přidávání napětí na čerpádle o hodnotu 0,3 V, což mělo za následek zvýšení průtoku a rovněž pořízení třech snímků na osciloskopu. Tento postup se opakoval až do hodnoty 5,3 V, na které se test ukončil. Po ukončení testu se provedl výpočet fázového posunu z pořízených obrázků uložených na USB. Byly zaznamenány všechny hodnoty vyčtené z uložených obrázků a zpracovány do přehledné tabulky. Fázový posun se zaznamenal do grafu pro lepší orientaci. Výsledky prokazovaly správný chod průtokoměru pouze při určitém napětí. Z těchto výsledků bylo nutné provést opakovaný test, který bude o něco podrobnější a tím i přesnější.

Tabulka 5 Naměřené hodnoty z prvního měření

					T=10us
Čerpadlo	Posun1	Posun2	Prům1	Prům2	Posun2
[V]	[us]	[d]	[us]	[d]	[us]
5,3	5,4	3,8	7,8	3,3	6,6
5,3	9,8	3,2	7,8	3,3	6,6
5,3	8,2	2,9	7,8	3,3	6,6
5,0	5,0	2,0	5,0	2,2	4,5
5,0	5,8	2,1	5,0	2,2	4,5
5,0	4,2	2,6	5,0	2,2	4,5
4,7	1,8	2,0	2,1	1,3	2,7
4,7	2,4	0,8	2,1	1,3	2,7
4,7	2,0	1,2	2,1	1,3	2,7
4,4	1,8	0,9	1,9	1,0	2,0
4,4	1,8	1,0	1,9	1,0	2,0
4,4	2,0	1,1	1,9	1,0	2,0
4,1	1,4	0,8	1,3	0,7	1,3
4,1	1,4	0,2	1,3	0,7	1,3
4,1	1,2	1,0	1,3	0,7	1,3
3,8	0,6	0,5	0,8	0,2	0,5
3,8	0,6	0,2	0,8	0,2	0,5
3,8	1,2	0,0	0,8	0,2	0,5
3,5	1,0	0,5	0,7	0,2	0,5
3,5	1,0	0,2	0,7	0,2	0,5
3,5	0,2	0,0	0,7	0,2	0,5

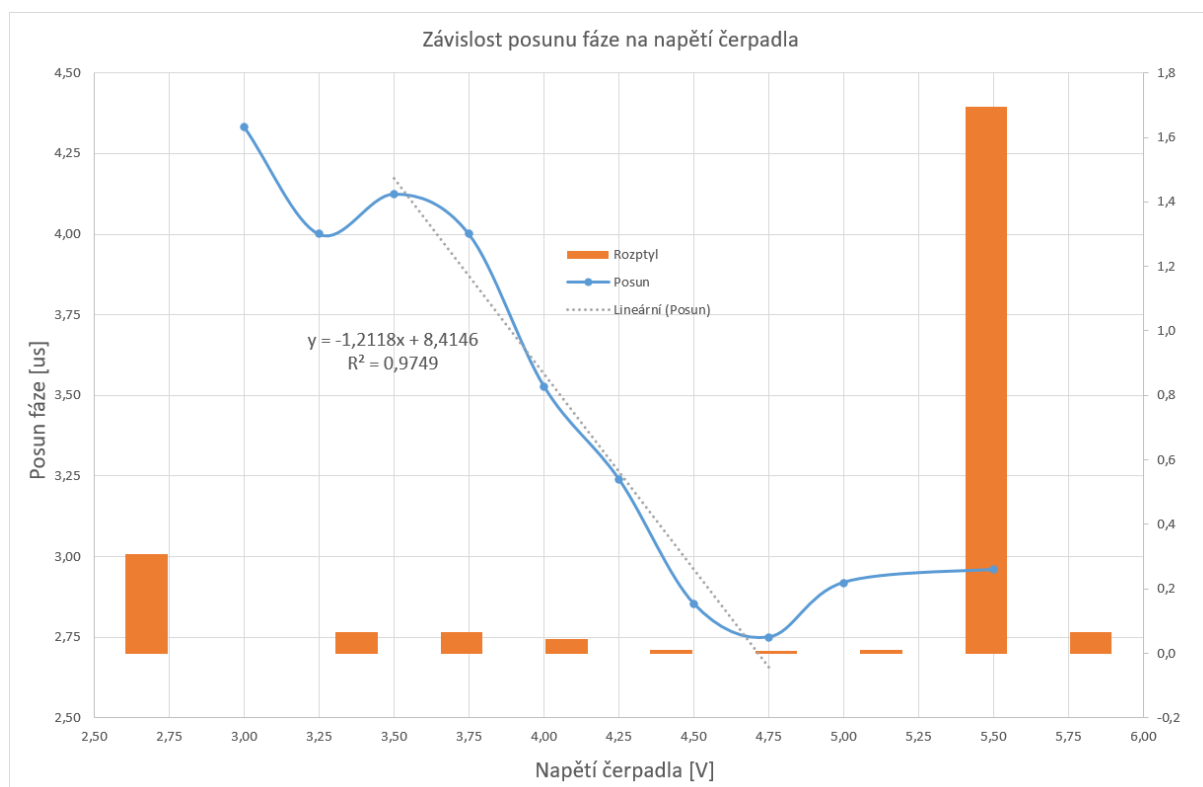


Graf 6 Fázový posun signálu vzhledem k průtoku média

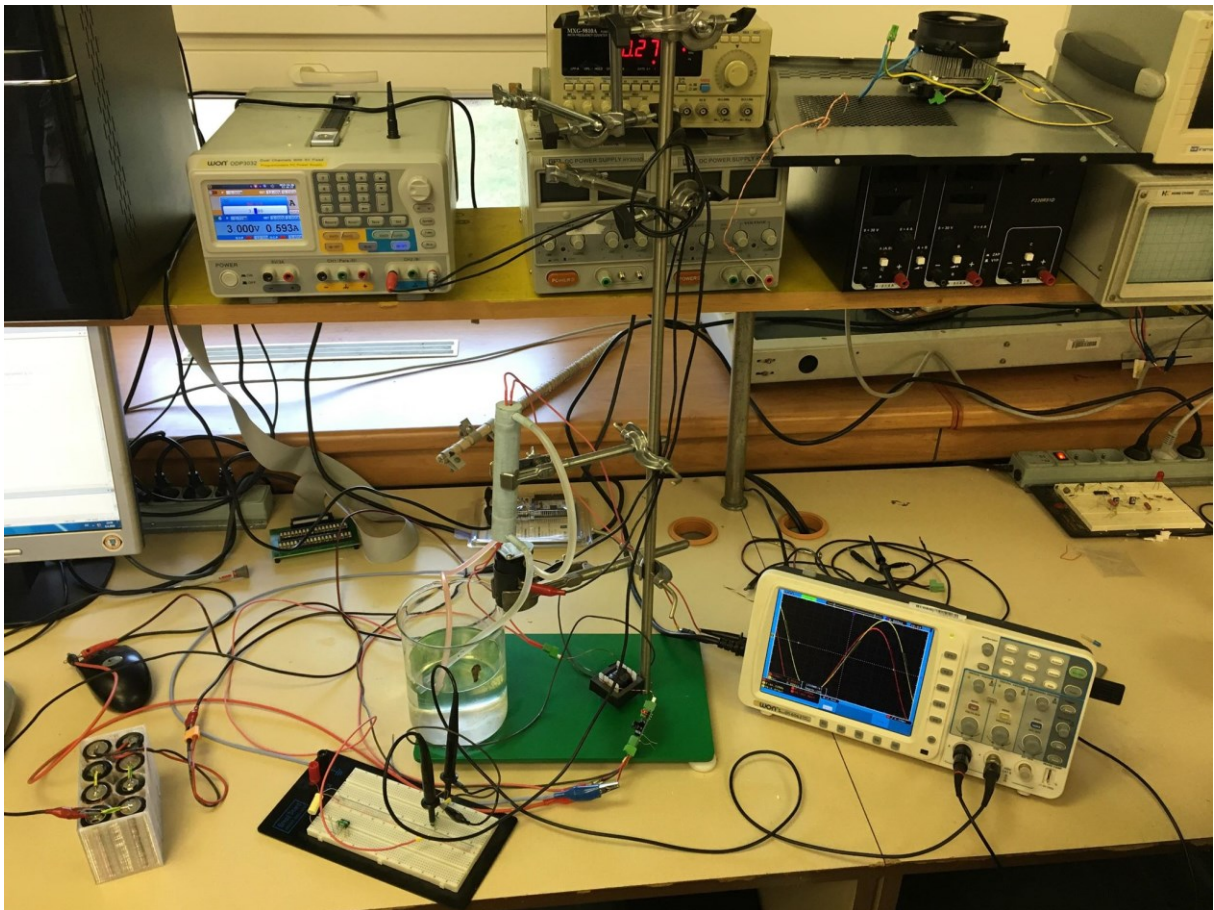
Druhý test proběhl obdobně jako test předešlý, ale více se zaměřil na podrobnější porovnání hodnot při určitém napětí. Tímto testem se mělo prokázat, zda průtokoměr pracuje bezproblémově či naopak s chybami při nižším nebo vyšším napětím. Testovat se začalo opět na hodnotě 3V, které se pouštěly do čerpadla a začaly se zaznamenávat hodnoty z pořízených snímků z osciloskopu. Hodnota napětí se zvyšovala o 0.25V až do hodnoty 6V. Na každé hodnotě napětí se pořídilo 5 snímků, aby se hodnoty mohly porovnat a zprůměrovat. Veškeré potřebné hodnoty vyčtené z obrázku se přenesly do přehledné tabulky a grafu. Po zprůměrování hodnot a přepočtu na fázový posun, nám hodnoty ukázaly jak správný chod, tak i chod chybný. V grafu je znázorněn oranžovou barvou rozptyl. Rozptyl ukazuje, jak jsou data rozptýlena okolo střední hodnoty. Obecně se rozptyl považuje za nejoblíbenější ukazatel variability a je ve statistice hojně využíván. Taktéž je v grafu vyznačen lineární posun, který je znázorněn pouze v pracovním rozsahu, ve kterém průtokoměr pracuje správně. Testem se potvrdil správný chod průtokoměru v rozmezí napětí 3.5V až 4.75V. Všechny ostatní testované hodnoty ukázaly nepřesný chod průtokoměru a z tohoto důvodu byl tento test velice důležitý.

Tabulka 6 Naměřené hodnoty z druhého měření

M [us]	d1	d2	d3	d4	d5	d1	d2	d3	d4	d5	D1	D2	D3	D4	D5
5	2,3	2,2	2,3				2,2	2,3				4,4	4,6		
5	4	5,2	4	5		2,4	2,3	2,6	1,5		6,4		6,6	6,5	
5	4					2,3					6,3				
5	4,2	4,5	3,8	4		2,5	1,6	2,5	2,4		6,7	6,1	6,3	6,4	
5	4,3	3,8	3,7	4,2		1,7	2,5	2,5	1,6		6	6,3	6,2	5,8	
2	8,9	8,6	8,7	8,7	9,2	6	6,2	6,4	6,2	5,9	14,9	14,8	15,1	14,9	15,1
2	8,2	8				6,6	6,7				14,8	14,7			
2	7	7,2	7,2			7	7	7			14	14,2	14,2		
2	6,7	6,9	7	6,9		7	7,1	7	7,1		13,7	14	14	14	
2	7	6,2	9,5	6,5		6,8	7	4	6,8		13,8	13,2	13,5	13,3	
2	7,1	7,6	7,2	7,7		6,6	6,6	6,5	6,6		13,7	14,2	13,7	14,3	
2	9,5	10	11,6	11,7		6,2	6	4,7	4,7		15,7	16	16,3	16,4	



Graf 7 Závislost posunu fáze na napětí čerpadla



Obr. 40. Měřicí soustava během druhého měření

5 ZÁVĚR

Cílem práce byla literární rešerše, která se zabývala problematikou měření průtoku různými metodami. Literární rešerše se zabývá tradičními i současnými způsoby měření průtoku a vysvětluje jejich použití v průmyslu. Podrobněji se zaměřuje na ultrazvukové průtokoměry a to na bázi Dopplerova jevu.

Dalším cílem bylo navržení ultrazvukového průtokoměru na bázi Dopplerova jevu a sestrojení měřícího řetězce. Tělo průtokoměru bylo vytištěno na 3D tiskárně a byl použit materiál H-PLA. Dále byly použity voděodolné transceivery, které pracují na kmitočtu 40 kHz. Rovněž byl sestrojen transformátor z feritového materiálu. U transformátoru je použito primární vinutí 8 závitů a sekundární vinutí 100 závitů a tímto bylo docíleno 12.5 krát větší hodnoty. Dále se vyrobil dostatečně silný zesilovač pro ultrazvukový senzor, který vykazoval hodnoty 50 V na výstupu a zajistil tak intenzivní signál.

V další části práce byly provedeny jednotlivá přípravná měření se vzduchem a otestování veškerých komponentů. Hodnoty, které potvrdily testy se vzduchem, byly přijatelné a z tohoto důvodu se přistoupilo na testy s vodou. První test s vodou se provedl na měřící soustavě a jeho výsledky nedopadly špatně. U některých hodnot napětí průtokoměr vykazoval menší rozptyl a z tohoto důvodu se muselo přistoupit k dalšímu podrobnějšímu testu. Druhý test probíhal obdobně jako test první, ale s tím rozdílem, že na určitých hodnotách napětí, které měly vliv na rychlost čerpadla se hodnoty měřily vícekrát a s delším časovým posunem oproti předcházejícímu testu. Těmito výsledky se potvrdilo, že průtokoměr dokáže pracovat správně a může se bez problémů používat a to v pracovní oblasti, která je 3.5 V až 4.75 V. V dalších měřených hodnotách byl chod průtokoměru chybný a musely se najít příčiny.

Příčinou pro špatný chod průtokoměru bylo čerpadlo, které při nízkém napětí do 3.5 V nedokázalo udržet plynulý chod, ale chod kolísavý a tímto výsledky nebyly věrohodné. Naopak při napětím vyšším tedy od hodnoty 4.75 V docházelo ke tvoření velkého množství bublinek ve vodě a z tohoto důvodu nebyly výsledné hodnoty reálné. Doporučení pro bezproblémový chod je vyzkoušet průtokoměr s jiným výkonnějším čerpadlem a provést podrobnější test v hodnotách do 3.5 V a nad hodnotu 4.75 V.

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ĎAĎO, S., BEJČEK, L., PLATIL, A. Měření průtoku a výšky hladiny. 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-156-x.
- [2] ČSN ISO 5167-1 Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku, Část 1: Clony, dýzy a Venturiho trubice vložené do zcela vyplněného potrubí kruhového průřezu, Český normalizační institut, Praha, 1993.
- [3] OKTÁBEC, K. Fisher-Rosemount představuje AnnubarO` Dieterich Standard, Automatizace, ročník 41, číslo 6, strana 343 - 345, 1998.
- [4] MILLER, R.W. Flow measurement Engineering Handbook, McGraw-Hill, New York, 1989.
- [5] Mentlík V., Pihera J., Polanský R., Prosr P., Trnka P. Diagnostika elektrických zařízení. místo neznámé : BEN, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [6] JENČÍK, J., Volf, J. a kol.: Technická měření. ČVUT v Praze, Praha 2000, ISBN 80-01- 02138-6
- [7] J., Roubal. Regulační technika v příkladech. místo neznámé : BEN, 2011. ISBN 978-80-7300-260-2.
- [8] KADLEC, K. Coriolisovy průtokoměry. AUTOMA: odborný časopis pro automatizační techniku, listopad 2010, roč. 16, č. 11, s. 40-45. [cit. 2018-01-06] Dostupný z WWW: < <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42308.pdf> > ISSN 1210-9592.
- [10] RIPKA, P. Senzory a převodníky. 1. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005 dotisk, 136 s. ISBN 80-01-03123-3.
- [11] KADLEC, K. Ultrazvukové průtokoměry - princip, vlastnosti, použití. AUTOMA: odborný časopis pro automatizační techniku. [cit. 2018-01-06] Dostupný z WWW: <http://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/10538.pdf>
- [12] VOJÁČEK, A. Zajímavé principy měření - Elektromagnetické (indukční) průtokoměry. automatizace.hw.cz. [cit. 2018-01-06]. Dostupný z WWW: <<http://automatizace.hw.cz/zajimave-principy-mereni-elektromagneticke-indukcni-prutokomery>>

[13] KINOVIČ, F., KÁŇA, R., KADLEC, K., AUTOMA: odborný časopis pro automatizační tehcniku. [cit. 2018-01-06] Dostupný z WWW: <http://automa.cz/cz/casopis-clanky/tepelne-hmotnostni-prutokomery-a-regulatory-2003_12_29006_0599/>

[14] VYSOKÁ ŠKOLA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ V PRAZE. Měření průtoku a proteklého množství. [cit. 2018-01-06] Dostupný z WWW: <<http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4-ram.htm>>

[15] Incropera F., DeWitt P., Bergamn L. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. místo neznámé : John Wiley & sons, 2006. ISBN-13: 978-0471457282.

[16] ŠILHAVÝ, M., Turbínové průtokoměry Hoffer a jejich vlastnosti. DataCon MSI. [cit. 2018-01-06]. Dostupný z WWW: <<http://www.datacon.cz/turbinove-prutokomery-hoffer-a-jejich-vlastnosti.html>>

[17] J., Váňa. Analyzátoary plynů a kapalin. Praha : SNTL, 1984.

[18] FELIXprinters | FELIX PRO 2 - 3D printer. [cit.2018-01-06]. Dostupný z WWW: <https://www.felixprinters.com/pro-two>

[19] Přístroje pro diagnostiku životního prostředí | Ekotechnika. [cit. 2018-02-7] Dostupné z: <<http://www.ekotechnika.cz/uploaded/files/PDFM%205.1%20Brochure.pdf#page=1>>

[21] STRNAD, R. Trendy měření průtoku. 1. vyd. Říčany u Prahy : Gas, 2004. ISBN 80-7328-072-8.

[22] Kadlec K., Kmínek M, Kadlec P. a kolektiv, Měření a řízení v potravinářských a biotechnologických výroách, KEY Publishing, Ostrava, 2015 , ISBN 978-80-7418-232-7

[23] ŠILHAVÝ, M. Turbínové průtokoměry a jejich vlastnosti. AUTOMA: odborný časopis pro automatizační techniku. [cit. 2018-01-06] Dostupný z WWW: <http://automa.cz/cz/casopis-clanky/turbinove-prutokomery-a-jejich-vlastnosti-2002_02_28343_1643>

[24] KADLEC, Karel. Snímače průtoku – principy, vlastnosti a použití (část 1). AUTOMA: časopis pro automatizační techniku. [cit. 2018-01-06]. Dostupný z WWW: <<http://automa.cz/download/au100605.pdf>>

[25] *easycnc* [cit. 2018-02-07]. Dostupný z WWW: <<https://www.easycnc.cz/>>.

[26] Farnell element 14 [cit. 2018-01-05]. Dostupný z WWW:
<<http://uk.farnell.com/multicomp/mcusd16a40s12ro/transceiver-40khz-16mm-metal/dp/2362677#anchorTechnicalDOCS>>

Seznam obrázků:

- Obr. 1. Oválový průtokoměr s ozubenými koly - princip a konstrukce [1]
- Obr. 2. Bubnový průtokoměr [14]
- Obr. 3. Clona, dýza, Venturiho trubice. Statický tlak před zúžením p_1 a v místě zúžení p_2 [24]
- Obr. 4. Princip Pitotovy trubice [24]
- Obr. 5. Coriolisův průtokoměr - bez proudící tekutiny a s působením Coriolisovy síly [14]
- Obr. 6. Lopatkový průtokoměr [14]
- Obr. 7. Rotametr [22]
- Obr. 8. Řez turbínovým průtokoměrem [16]
- Obr. 9. Obecný princip a praktická realizace průtokoměru [12]
- Obr. 10. Princip Dopplerova průtokoměru [11]
- Obr. 11. Ultrazvukový průtokoměr s vyhodnocením doby průchodu signálu [11]
- Obr. 12. Umístění ultrazvukových měničů v měřící trubici [11]
- Obr. 13. Umístění ultrazvukových měničů s reflektorem [11]
- Obr. 14. Umístění ultrazvukových s opakovaným odrazem [11]
- Obr. 15. Axiální uspořádání ultrazvukových měničů [11]
- Obr. 16. Průtokoměr Greyline [19]
- Obr. 17. Princip měření průtokoměrem Greyline [19]
- Obr. 18. Průtokoměr
- Obr. 19. Vnitřní barvení průtokoměru
- Obr. 20. 3D tiskárna FELIX PRO 2 [18]
- Obr. 21. Transceiver v průtokoměru
- Obr. 22. Generátor METEX
- Obr. 23. Laboratorní zdroj DC Power Supply

- Obr. 24. Osciloskop OWON SDS 6062
- Obr. 25. Zdrojová část a kondenzátor
- Obr. 26. Vstupní přizpůsobovací část
- Obr. 27. Výstupní výkonová část
- Obr. 28. Frekvenční charakteristika operačního zesilovače
- Obr. 29. Maximální rozkmit
- Obr. 30. Zesilovač
- Obr. 31. Základní deska zesilovače
- Obr. 32. Schéma zesilovače
- Obr. 33. Transformátor
- Obr. 34. Propojení zesilovače s transformátorem
- Obr. 35. Měřicí soustava
- Obr. 36. Měření se vzduchem
- Obr. 37. Výsledné hodnoty měření se vzduchem
- Obr. 38. MATLAB
- Obr. 39. Digitální karta
- Obr. 40. Měřicí soustava během druhého měření

Seznam tabulek a grafů

Tabulka 1 Specifikace průtokoměru Greyline PDFM 5.1

Tabulka 2 Specifikace senzoru

Tabulka 3 Parametry pro tisk s materiálem PLA a ABS

Tabulka 4 Technická specifikace snímače MCUSD14A58S9RS-30C 2 [26]

Tabulka 5 Naměřené hodnoty z prvního měření

Tabulka 6 Naměřené hodnoty z druhého měření

Graf 1 Měření průtoku vzduchu

Graf 2 Měření průtoku vody bez zesilovače

Graf 3 Měření průtoku vody se zesilovačem

Graf 4 Citlivost snímače

Graf 5 Hladina akustického tlaku

Graf 6 Fázový posun signálu vzhledem k průtoku média

Graf 7 Závislost posunu fáze na napětí čerpadla

PŘÍLOHY

CD s obrazovou dokumentací